

---

Федеральное агентство по образованию

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

№ 4 (109). Июнь, 2010

---

**Серия: Естественные и технические науки**

---

Главный редактор

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

Зам. главного редактора

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

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

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

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

Статьи журнала рецензируются.

Адрес редакции журнала

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

Тел. (8142) 76-97-11

E-mail: uchzap@mail.ru

**uchzap.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. Йюенсуу, 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>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,<br>профессор (Санкт-Петербург)                          | <b>Б. М. ШИРОКОВ</b><br>кандидат физико-математических наук,<br>доцент (Петрозаводск)    |
| <b>Е. И. РАТЬКОВА</b><br>ответственный секретарь серии (Петрозаводск)                                    | <b>В. В. ЩИПЦОВ</b><br>доктор геолого-минералогических наук,<br>профессор (Петрозаводск) |

---

Federal Educational Agency

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

**№ 4 (109). June, 2010**

---

**Natural & Engineering Sciences**

---

Chief Editor

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

Chief Deputy Editor

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

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

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

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

The Editor's Office Address

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

Petrozavodsk, Republic of Karelia

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

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

# Editorial Council

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

## Editorial Board of the Series “Natural & Engineering Sciences”

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

## СОДЕРЖАНИЕ

### БИОЛОГИЯ

- Korosov A. V., Zamber N. S.,  
Fomichev S. N., Uzenbaev S. S.  
Common frog (*Rana Temporaria* L.)  
spawn and tadpoles survival rates in small  
transient basins ..... 7
- Кучко Я. А., Кучко Т. Ю.  
Сообщество зоопланктона Онежского  
озера в районах размещения форелевых  
хозяйств как индикатор качества воды ..... 9
- Сергиенко Л. А.  
О морфологической изменчивости в ро-  
де Гонкения семейства Гвоздичных  
(*Honckenya* Erch. семейства *Caryophyl-  
laceae*) ..... 13
- Спиридонова Е. А., Сысоева М. И., Шерудило Е. Г.  
Влияние ежесуточных кратковременных  
снижений температуры и фотопериода  
на развитие декоративных растений ..... 18
- Хижкин Е. А., Илюха В. А., Лотош Т. А.,  
Виноградова И. А., Анисимов В. Н.  
Особенности реагирования антиокси-  
дантных ферментов в органах крыс  
на нарушение циркадианных ритмов на  
разных этапах онтогенеза ..... 22

### МЕДИЦИНСКИЕ НАУКИ

- Жестяников А. Л., Доршакова Н. В., Карапетян Т. А.  
Макро- и микроэлементы в нейрохи-  
мических, нейрофизиологических ме-  
ханизмах и обеспечении нормального  
кровообращения вещества головного  
мозга ..... 27
- Кузнецова Л. В., Мейгал А. Ю.,  
Варламова Т. В., Соколов А. Л.  
Методы неинвазивной диагностики  
при синдроме двигательных наруше-  
ний у детей раннего возраста ..... 36
- Маркелов Ю. М., Шеголева Л. В.  
Математическая модель распростране-  
ния бациллярного туберкулеза ..... 42

### НАУКИ О ЗЕМЛЕ

- Кулешевич Л. В., Лавров О. Б.  
Самородная медь, золото и медные про-  
мыслы в Карелии ..... 46

### СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННЫЕ НАУКИ

- Ильинов А. А., Политов Д. В., Раевский Б. В.  
Влияние способов лесовозобновления на  
генетическую структуру популяций ели  
финской *Picea x fennica* (Regel) Kom. .... 50
- Матюшкин В. А., Мошников С. А., Бердников И. А.  
Формирование и продуктивность сосно-  
вых насаждений на осушенных болотах ..... 56

### ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ

- Васильев С. Б., Колесников Г. Н.  
Логистический подход к моделированию  
фракционирования сыпучих материалов ..... 61
- Шегельман И. Р., Скрыпник В. И., Кузнецов А. В.  
Анализ показателей работы и оценка  
эффективности лесозаготовительных  
машин в различных природно-произ-  
водственных условиях ..... 66
- Аюкаев Р. И., Коряйкина А. В., Селиванов А. С.  
Эффективность биосорбционной предочи-  
стки высокоцветных маломутных вод из  
поверхностных водоисточников ..... 76
- Ушакова Л. М.  
Малоэтажная высокоплотная застройка  
в реконструкции городов ..... 82
- Косенков А. Ю.  
Классификация стен в традиционном де-  
ревянном зодчестве Карелии и сопредельных  
территорий Русского Севера.  
Часть 2 ..... 86

### ФИЗИКО-МАТЕМАТИЧЕСКИЕ НАУКИ

- Всероссийская школа-семинар для молодых ученых  
России по теме «Проблемы и приложения электрораз-  
рядной обработки в индустрии наносистем и наномате-  
риалов».
- Подгорный В. И., Куц С. Д., Яковлев А. Н., Белашев Б. З.  
О некоторых результатах исследования  
синтеза фуллеренов и нанотрубок в ус-  
ловиях аргонового дугового разряда ..... 98
- Фофанов А. Д., Лобов Д. В., Логинев Д. В.  
Диагностика порошковых материалов  
методами рентгенографии ..... 106

### Contents..... 116

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

Учредитель: ГОУ ВПО «Петрозаводский государственный университет»

Редактор Г. А. Мехралиева. Корректор С. Л. Смирнова. Переводчик Н. К. Дмитриева. Дизайн, верстка И. Г. Лежнев.

Подписано в печать 22.06.2010. Формат 60х90 1/8. Бумага офсетная. Печать офсетная.  
10 уч.-изд. л. Тираж 500 экз. (1-й завод – 145 экз.) Изд. № 155.

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

**ANDREI V. KOROSOV**

Doctor of Biological Sciences, Professor Chair of zoology and ecology, Department of biology and ecology, Petrozavodsk State University

*korosov@psu.karelia.ru*

**NATALIE S. ZAMBER**

Postgraduate student, Chair of zoology and ecology, Department of biology and ecology, Petrozavodsk State University

*zamber.nat@mail.ru*

**SERGEI N. FOMICHEV**

Candidate of Biological Sciences, Petrozavodsk

*fomsen@mail.ru*

**SERGEI S. UZENBAEV**

Engineer FGU, Institute of plants quarantine research, Petrozavodsk

*korosov@psu.karelia.ru*

## COMMON FROG (*RANA TEMPORARIA* L.) SPAWN AND TADPOLES SURVIVAL RATES IN SMALL TRANSIENT BASINS

The following study defines common frog (*Rana temporaria* L.) survival rates at various development stages in small transient basins situated in the southern part of the Republic of Karelia, Russia. Low survival rates indicate insufficient reproduction capability in transient basins during droughty seasons.

Key words: Amphibia, Ranidae, development stages, survival rate, reproduction of population, reproductive basins

The maturing succession stages of anura are eggs, tadpoles and adults. Their living environment differs. Therefore they represent segregated aqueous and terrestrial ecological populations [8]. The following factors affect the number of survivors at each stage of development: the variety of heterogeneous environmental determinants as well as the quantity of creatures from the previous phase.

It is well known that the majority of common frogs perish at the early stages of ontogenesis [4]. Still, the exact common frog spawn and tadpoles survival rates in different types of basins are rare to obtain in literature.

The purpose of this study is to evaluate common frog (*Rana temporaria* L.) spawn and tadpoles survival-rates in transient basins in the southern regions of Karelia.

### MATERIAL AND METHODS

Monitoring was conducted at three different locations (transient basins) in the vicinity of Petrozavodsk city (61°30' N, 34°25' W) in the course of two observation intervals in 2002 and 2003. Basin 1 and 3 were represented by eroded and flooded ruts of a

dirt road. Basin 3 was a small sand-pit at the dirt road side. The maximum area of each basin during the spring water filling was estimated up to 20–30 m<sup>2</sup> with the water volume around 15–20 m<sup>3</sup>. During the summer partial drying up of the basins caused the area (1.5–3 times less) and volume (to 5–7 m<sup>3</sup>) reduction.

The total amount of laid eggs in each basin ( $N_e$ ) was calculated by multiplication of the number of layings ( $N_l$ ) by the average number of eggs in one laying ( $N_{e/l}$ ). The value of  $N_{e/l}$  was calculated using an ordinary «volume method» [5].

The absolute number of tadpoles ( $N_t$ ) in the basins was determined by mark-and-recatching method [2]. A total of 533 larvae were marked by vital dye followed by the second catching next day [7]. The survival rate estimations at germinal stages were based on the following calculation:  $S_e = N_t / N_e$ .

The absolute number of lately metamorphosed and dissipating young frogs ( $N_{0+}$ ) was estimated by means of total catching in two basins fenced with polythene membranes. The survival rate of tadpoles was defined by the following formula:  $S_t = N_{0+} / N_t$ .

The combined embryonic and larval survival rate was calculated as  $S_{tot} = N_{0+} / N_{ov}$ .

## RESULTS

The general common frog death-rate dynamics at its tadpoles stage is convenient to observe on the basin 2 samples taken in 2002 (Table). From the total number of 73.390 eggs only 753 matured to larva stage, i.e.  $S_o = 1\%$ . Then, only 107 larvae had survived to become yearlings and leave the basin ( $S_t = 14$ ). So the general spawn survival rate equals  $S_{tot} = 0.15\%$ .

Common frog eggs and tadpoles survival rates in small transient basins

	Reservoir			
	Basin # 1 2002	Basin # 2 2002	Basin # 2 2003	Basin # 3 2003
number of layings, $N_l$	189	82	58	110
average eggs number in a laying, $N_{e/l}$	1264±88	895±158	1159±107	1254±136
number of eggs, $N_e$	238896±16632	73390±12956	67222±17334	137940±29104
number of tadpoles, $N_t$	3212	753±114	—	—
survival rate of eggs, $S_e$ , %	1.3	1.0	—	—
survival rate of tadpoles, $S_t$ , %	—	14	—	—
number of lately metamorphosed young frogs, $N_{0+}$	—	107	86	850
total embryonic and larval survival rate, $S_{tot}$ , %	—	0.15	0.13	0.62

The analysis of all obtained data shows the following results: the survival rate at larva stage equals

$S_t = 1.0\text{--}1.3\%$ , whereas the general survival rate varies within the limits of  $S_{tot} = 0.13\text{--}0.62\%$ .

These estimations are close to those presented in literature: 6.00–0.015 % [3], [8], [6]. Lower survival rates were observed in small transient basins where relatively high concentration of spawn and tadpoles was presented. The same results were observed in our study. However, it should be noted that summers of 2001–2003 were abnormally warm in Karelia and resulted in considerable transient basins drying up. Probably, in more rainy years the survival rates might be higher.

In conclusion let us examine common frog reproduction potency in the basins studied. For instance, in basin 2 (year of 2002) the number of lately metamorphosed frogs that had left the basin was approximately one and a half times lower than the number of adult frogs who came to spawn to the basin originally ( $82 \times 2 = 164$ ). In basin 3 the situation developed in a better way for the number of lately metamorphosed frogs surpassed the number of parents by four times. Nevertheless just a few of them will survive to maturity because the young frogs survival rate during first weeks of their terrestrial life reaches 30–70 % [1] following by the yearlings survival rate up to 50 % [9]. Therefore it would be fair to infer that conditions in the basins studied are disadvantageous and do not provide common frogs reproduction. Probably such basins serve only as temporary bases on the frontier of species expansion.

**Acknowledgments.** We are very grateful to S. S. Gladkov for his help while translating this article.

## REFERENCES

1. Ananjeva N. B. et al., (1998), "The Amphibians and Reptiles. The Encyclopedia of Russian nature", ABF, Moscow [in Russian].
2. Dinesman L. G., Kaletskaja M. N., (1952), "The Methods of amphibians and reptilians registration," in: The Methods of number registration and geographic dispersion of Terrestrial Vertebrates, Moscow, pp. 329–341 [in Russian].
3. Ivanter E. V. (1968), "The materials on the common frog ecology at North," in: The Works of "Kivach" reserve, 1, Petrozavodsk, pp. 136–145 [in Russian].
4. Kutenkov F. P., Panarin A. E., and Shklyarevich F. N. (1990), "Reproductive ecology of tailless amphibians of Karelia and Kola Peninsula," in: Terrestrial Vertebrates in State Natural Reserves of the North of the European Part of RSFSR, Moscow, pp. 54–70 [in Russian].
5. Lyapkov S. M., and Severtsov A. S. (1994) "The influence of the initial number of generations on the number of postlarval individuals, their body size and the dates of metamorphosis in common frogs (*Rana temporaria*) and moor frogs (*R. arvalis*)," Zool. Zh., 73(1), 97–111 [in Russian].
6. Lyapkov S. M., Tsherdantcev V. G., Tsherdantceva T. M., and Severtsov A. S. (2000) "The survival and growth of brown frog yearlings during their distribution from reproductive ponds," Zool. Zh., 79(6), 729–781 [in Russian].
7. Severtsov A. S. and Surova G. S. (1979), "The death the common frog tadpoles (*Rana temporaria*) and its determinative factors," Zool. Zh., 108(3), 393–403 [in Russian].
8. Severtsov A. S. and Surova G. S. (1989), "The Dynamics of the brown frogs number in Moscow region," in: Amphibians and Reptiles of Moscow region, Science, Moscow, pp. 110–120 [in Russian].
9. Zalezsky G. (1938), "The dynamics of the number of some amphibian species", The collection of science works of students' scientific organizations of Moscow university, 2, Moscow, pp. 3–28 [in Russian].



УДК 639.331.7

**ЯРОСЛАВ АЛЕКСАНДРОВИЧ КУЧКО**

кандидат биологических наук, научный сотрудник лаборатории экологии рыб и водных беспозвоночных Института биологии, Карельский научный центр РАН  
*kuchko@drevlanka.ru*

**ТАМАРА ЮРЬЕВНА КУЧКО**

кандидат биологических наук, доцент кафедры зоологии и экологии эколого-биологического факультета, Петрозаводский государственный университет  
*kuchko@drevlanka.ru*

### **СООБЩЕСТВО ЗООПЛАНКТОНА ОНЕЖСКОГО ОЗЕРА В РАЙОНАХ РАЗМЕЩЕНИЯ ФОРЕЛЕВЫХ ХОЗЯЙСТВ КАК ИНДИКАТОР КАЧЕСТВА ВОДЫ**

Проведено изучение сообществ зоопланктона в трех губах Онежского озера – Уницкой, Святухе и Кефтенъ, где в настоящее время размещены форелевые садковые хозяйства. Дана характеристика видового состава, количественных и структурных показателей зоопланктона в условиях биогенного загрязнения.

Ключевые слова: зоопланктон, Онежское озеро, форелевые хозяйства

**ВВЕДЕНИЕ**

Садковое форелеводство является одним из приоритетных направлений рыбохозяйственной деятельности на внутренних водоемах Республики Карелия. Это обусловлено главным образом уникальными природными условиями – наличием большого количества глубоководных водоемов с водой высокого качества и оптимальным температурным режимом. По данным Управления рыбного хозяйства Министерства сельского, рыбного хозяйства и экологии РК, на 01.01.2009 в республике зарегистрированы 84 форелевых хозяйства проектной мощностью 37,6 тыс. т. Из них действующих 45 предприятий, планируемых – 39.

Интенсивное развитие форелеводства в республике ставит проблему сохранения природных комплексов хозяйственных водоемов в ненарушенном состоянии. Особенно актуальной она становится в связи с изменениями экологического законодательства РФ. Так, до недавнего времени для организации рыбоводного хозяйства требовалась разработка оценки воздействия на

окружающую среду (ОВОС), которая входила в пакет документов для получения лицензии на водопользование. В настоящее время аквакультура не рассматривается как деятельность, которая оказывает существенное воздействие на окружающую среду. Она не входит в перечень объектов, подлежащих обязательной экологической экспертизе. В связи с этим для осуществления мероприятий по охране водных экосистем в местах расположения рыбоводных хозяйств требуется проведение регулярного мониторинга.

Основная цель исследований заключалась в оценке состояния сообщества зоопланктона в районах размещения форелевых хозяйств.

Гидробиологические исследования при мониторинге водных экосистем в условиях антропогенного влияния имеют ряд преимуществ, так как короткий жизненный цикл беспозвоночных зоопланктона позволяет даже при проведении ограниченных во времени наблюдений не только определить современное состояние водоемов, но и оценить возможные изменения. Динамика таксономической структуры и количественных показателей зоопланктона как выраженный отклик

на изменение условий обитания может служить важным показателем качества воды и протекающих в водоеме процессов эвтрофирования.

## МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Работа выполнялась на Онежском озере в губах Уницкая (2005 год), Святуха (2006 год) и Кефть (2008 год), где функционируют садковые хозяйства для выращивания радужной форели. Проектная мощность хозяйств составляет 600, 400 и 300 т форели в год соответственно. В настоящее время в этих губах выращивается 1200 т радужной форели. Гидробиологическая съемка проводилась трижды за вегетационный период (июнь, август, октябрь).

Отбор проб зоопланктона осуществлялся батометром Руттнера (объем – 2 л). Облавливались все слои воды, начиная с поверхностного, с интервалом 1,0 м. Интегрированные пробы (поверхность–дно) процеживались через газ № 70, концентрировались до 100 мм<sup>3</sup> и фиксировались 4 % формалином. Последующая обработка проб проводилась в лаборатории по стандартной методике [10].

Станции для отбора проб располагались по следующей схеме: непосредственно около садков (20–30 м), на удалении (200–300 и 500–700 м). Общее количество станций в каждой губе составляло не менее 9.

Для анализа возможных изменений в сообществе зоопланктона применялись следующие индикационные показатели: общее число видов, соотношение таксономических групп, отношения  $V_{crus}/V_{rot}$ ,  $N_{clad}/N_{cop}$ ,  $V_{cycl}/V_{cal}$  [1]. Также рассчитывались индекс видового разнообразия [13] и индекс сапробности [9], [4]. Трофический статус водоемов оценивался по шкале трофности для зоопланктона по С. П. Китаеву [3].

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Онежское озеро (60°53'–62°55' с. ш. и 34°13'–36°28' в. д.) является самым крупным пресноводным водоемом Карелии. В последние годы оно широко используется для промышленного выращивания радужной форели в садках. В настоящее время уже функционирует 14 форелевых хозяйств и проектируется еще 3. Общий объем товарной форели по озеру составил в 2008 году 5300 т, то есть 50 % от всей выращиваемой в Карелии форели.

Основные гидрологические показатели заливов, где проводились исследования, приведены в табл. 1. Уницкая губа является самой крупной по площади и наиболее глубокой, губа Святуха неглубокая, довольно узкая и прогреваемая, с хорошо развитой высшей водной растительностью. Кефть губа также неглубокая и хорошо прогреваемая, через пролив соединяется с Повенецким заливом Онежского озера.

По мнению ряда авторов, видовой состав зоопланктона является одним из консервативных

признаков и может сохранять относительную стабильность в условиях эвтрофирования в течение десятилетий [1]. Анализ полученных нами материалов свидетельствует в пользу этой точки зрения. Общий список организмов зоопланктона, отмеченных за период исследований, насчитывает 38 видов (табл. 2). Из них *Rotatoria* – 15 видов, *Cladocera* – 15, *Calanoida* – 4 и *Cyclopoida* – 4. Видовой состав зоопланктона на всех трех участках является типичным для крупных заливов Онежского озера и отражает общие тенденции изменения планктонной фауны водоема в последние десятилетия [5], [6].

Среди коловраток (одной из наиболее чувствительных к эвтрофированию групп зоопланктона) доминируют *A. priodonta*, *K. longispina* и *P. dolichoptera*, которые являются типичными представителями ротаторного комплекса Онежского озера [12]. Из индикаторов повышенной трофности в районах размещения форелевых хозяйств можно отметить *P. luminosa*, *B. angularis* и *E. dilatata*, однако численность их невелика (не более 0,5 % от общей). Основу планктонного комплекса ракообразных составляют широко распространенные в больших озерах Карелии представители северной фауны (*D. (Daphnia) cristata*, *B. (Eubosmina) coregoni*, *E. gracilis*), а также ряд эвритопных организмов, отличающихся широкой экологической валентностью (*M. leuckarti*, *Ch. sphaericus*, *B. (Bosmina) longirostris*). В составе копепоид Уницкой губы и губы Святуха был отмечен холодноводный стено-термный реликтовый рачок *L. grimaldii* var. *marcrurus*, который является характерным компонентом пелагиали Онежского озера и индикатором олигосапробных условий [11]. Из типичных представителей тепловодно-стенотермного комплекса был отмечен только один вид *D. brachyurum*. В литоральной зоне видовой состав обогащается за счет представителей зарослевого комплекса – видов семейства *Chydoridae* и крупных кладоцер *P. pediculus* и *S. Crystallinae*.

Средние количественные показатели зоопланктона по группам за вегетационный период приведены в табл. 3.

Таблица 1  
Гидрологические показатели  
исследуемых водных объектов

Показатели	Кефть	Святуха	Уницкая
Площадь водной поверхности, км <sup>2</sup>	8,5	36,4	166,0
Наибольшая длина, км	15,0	35,0	50,0
Наибольшая ширина, км	1,0	2,0	5,5
Средняя глубина, м	3,0	3,0	11,0
Максимальная глубина, м	25,0	15,0	33,0
Прозрачность, м	2,5	2,5	4,0
Удельный водосбор	31,2	7,7	1,67
Показатель условного водообмена	3,3	0,80	0,05
pH	6,3–7,7	6,6–7,4	6,6–7,4

**Таблица 2**  
Видовой состав зоопланктона в районах исследований

Вид	Уницкая, 2005 год	Святуха, 2006 год	Кефть, 2008 год
Класс <i>Rotatoria</i> Коловратки			
1 <i>Synchaeta pectinata</i> (Ehrenberg 1832)	–	–	+
2 <i>Brachionus angularis</i> (Gosse 1851)	–	+	–
3 <i>B. calyciflorus spinosus</i> (Wierzeiski 1891)	–	–	+
4 <i>Polarthra luminosa</i> (Kutikova 1962)	–	+	+
5 <i>P. dolychoptera</i> (Idelson 1925)	+	+	–
6 <i>Bipalpus hudsoni</i> (Imhof 1891)	+	+	+
7 <i>Asplanchna priodonta</i> (Gosse 1850)	+	+	+
8 <i>Keratella cochlearis</i> (Gosse 1851)	+	+	+
9 <i>K. quadrata</i> (Mullek 1786)	–	+	–
10 <i>Kellicottia longispina</i> (Kellicott 1879)	+	+	+
11 <i>Conochilus unicornis</i> (Rousselet 1892)	+	–	+
12 <i>Euchlanis dilatata</i> (Ehrenberg 1832)	–	+	–
13 <i>Trichocerca longiseta</i> (Shrank 1802)	–	+	+
14 <i>T. insignis</i> (Herrick 1885)	+	–	–
15 <i>Filinia longiseta</i> (Ehrenberg 1834)	–	+	–
Класс <i>Crustacea</i> Ракообразные			
Отряд <i>Copepoda</i> Веслоногие раки			
16 <i>Limnocalanus macrurus</i> (Sars 1863)	+	+	–
17 <i>Eurytemora lacustris</i> (Poppe 1887)	+	+	–
18 <i>Eudiaptomus gracilis</i> (Sars 1863)	+	+	+
19 <i>Heterocope appendiculata</i> (Sars 1863)	+	+	+
20 <i>Cyclops strenuus</i> (Fisher 1851)	+	+	+
21 <i>Megacyclops viridis</i> (Jurine 1820)	–	+	–
22 <i>Mesocyclops leuckarti</i> (Claus 1857)	+	+	+
23 <i>Thermocyclops oithonoides</i> (Sars 1863)	+	+	+
Надотряд <i>Cladocera</i> Ветвистоусые			
24 <i>Limnosa frontosa</i> (Sars 1862)	+	+	+
25 <i>Sida crystallina crystallina</i> (O. F. Muller 1776)	+	+	–
26 <i>Diaphanosoma brachyurum</i> (Lievins 1848)	+	+	+
27 <i>Holopedium gibberum</i> (Zaddach 1855)	+	+	+

28 <i>Daphnia (Daphnia) longispina</i> (O. F. Muller 1785)	+	+	+
29 <i>D. (Daphnia) cristata</i> (Sars 1862)	+	+	+
30 <i>Ceriodaphnia quadrangula</i> (O. F. Muller 1785)	–	+	+
31 <i>Chydorus sphaericus</i> (O. F. Muller 1785)	+	+	+
32 <i>Alona quadrangularis</i> (O. F. Muller 1785)	–	–	+
33 <i>Alonella nana</i> (Baird 1850)	–	–	+
34 <i>Bosmina (Bosmina) longirostris</i> (O. F. Muller 1785)	+	+	+
35 <i>B. (Eubosmina) coregoni</i> (Baird 1857)	+	+	+
36 <i>Polyphemus pediculus</i> (L. 1778)	+	+	+
37 <i>Bythotrephes brevimanus</i> (Lilljeborg 1901)	+	–	–
38 <i>Leptodora kindtii</i> (Focke 1844)	+	+	+

**Таблица 3**

Средние количественные показатели зоопланктона за вегетационный период

Группы	Уницкая, 2005 год		Святуха, 2006 год		Кефть, 2008 год	
	N	B	N	B	N	B
<i>Rotatoria</i>	5,6	0,117	6,6	0,185	27,1	0,677
<i>Cladocera</i>	5,7	0,417	8,4	0,925	29,3	1,431
<i>Cyclopoida</i>	2,4	0,101	15,2	0,200	18,1	0,383
<i>Calanoida</i>	2,4	0,235	4,9	0,200	0,6	0,045
<i>Nauplii</i>	1,0	0,014	4,4	0,030	1,9	0,012
Всего	17,1	0,884	38,5	1,540	77,0	2,548

Примечание. N – численность, тыс. экз./м<sup>3</sup>; B – биомасса, г/м<sup>3</sup>.

Основу биомассы зоопланктона на трех исследованных участках создают ветвистоусые ракообразные, главным образом виды *pp. Bosmina* и *Daphnia*. На их долю приходится от 47 % в Уницкой губе до 60 % в губе Святуха. Копеподы образуют от 16 % (Кефть губа) до 38 % (Уницкая губа), соотношение биомасс циклопид и каланид в группе веслоногих ракообразных также значительно варьирует. Массовая доля коловраток в Уницкой губе и губе Святуха составляет 12–13 %, возрастая до 27 % в Кефть губе.

Повышение трофности водоемов сопровождается структурными изменениями в планктотрофе, при этом наблюдается перераспределение относительного значения главных систематических групп. К числу характерных признаков можно отнести увеличение доли кладоцер и коловраток в образовании общей биомассы зоопланктона и снижение доли копепод. В группе веслоногих также наблюдается уменьшение доли крупных каланид и усиление роли циклопид, особенно за счет представителей *pp. Cyclops* и *Mesocyclops*. Явления такого рода сопровождают процесс эвтрофирования в разнотипных водоемах и достаточно хорошо изучены [1].

В табл. 4 приведены индексы сапробности и некоторые структурные показатели сообщества зоопланктона, использующиеся в качестве индикаторов при проведении водных экологических исследований.

**Таблица 4**  
Структурные показатели зоопланктона за вегетационный период

Показатель	Уницкая, 2005 год	Святуха, 2006 год	Кефть, 2008 год
Число видов	27	33	28
$B_{\text{crus}}/B_{\text{rot}}$	6,5	7,3	2,8
$N_{\text{clad}}/N_{\text{cop}}$	1,0	0,3	1,4
$B_{\text{cyc}}/B_{\text{cal}}$	0,4	1,0	8,5
Индекс Шеннона, бит	2,12	1,95	1,80
Индекс сапробности	1,58	1,72	1,83
Пантле–Букка			

Интерпретируя показатели, основанные на соотношениях численности и биомассы различных групп зоопланктона, можно отметить, что Кефть губа характеризуется наиболее высоким трофическим статусом по сравнению с двумя другими. На это, в частности, указывает повышенная доля кладоцер-фильтраторов (*D. cristata*, *B. longirostris*) и коловраток (главным образом за счет массового развития *A. priodonta*) в образовании общей биомассы зоопланктона, а также преобладание мелких циклопид в группе веслоногих ракообразных. *A. priodonta* является факультативным хищником и

оказывает значительное влияние на трофическую структуру зоопланктоценоза. Увеличение численности коловраток и возрастание роли хищников в планктонном сообществе связывают с повышенным поступлением в водоем алохтонного органического вещества и усиленным развитием бактериопланктона [7], [2]. Массовое развитие кладоцер-фильтраторов также указывает на укрепление трофической базы зоопланктона. В целом количественные показатели и видовой состав зоопланктона на трех исследованных участках схожи с районами Онежского озера, которые испытывают влияние промышленных, бытовых и сельскохозяйственных стоков (Кондопожская и Петрозаводская губы) [7].

Таким образом, по уровню количественного развития зоопланктона исследуемые заливы можно отнести к трем типам. Уницкая губа характеризуется как  $\beta$ -олиготрофный участок Онежского озера, губа Святуха – как  $\alpha$ -мезотрофный, Кефть губа – как  $\beta$ -мезотрофный. Средняя величина индекса сапробности колеблется в пределах 1,58 (Уницкая губа) – 1,83 (Кефть губа), что соответствует классу умеренно загрязненных  $\beta$ -мезосапробных водных объектов. Учитывая возросшие за последние 20 лет объемы выращивания товарной форели, целесообразна организация регулярного гидробиологического мониторинга, особенно в водоемах, используемых для промышленного рыбководства, для корректного представления о возможных сукцессиях в водных экосистемах.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Андроникова И. Н. Изменения в сообществе зоопланктона в связи с процессом эвтрофирования // Эвтрофирование мезотрофного озера. Л.: Наука, 1980. С. 78–99.
2. Думнич Н. В. Ракообразные (Crustacea) и коловратки (Rotatoria) крупных озер Вологодской области: Автореф. дис. ... канд. биол. наук. Петрозаводск, 2000. 25 с.
3. Китаев С. П. Основы лимнологии для гидробиологов и ихтиологов. Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2007. 390 с.
4. Куликова Т. П. Рекомендации по определению сапробности с учетом биологических особенностей планктонных организмов Карелии. Петрозаводск: КФ АН СССР, 1983. 6 с.
5. Куликова Т. П. Зоопланктон // Экосистема Онежского озера и тенденции ее изменения. Л.: Наука, 1990. С. 207–216.
6. Куликова Т. П., Кустовлянкина Н. Б., Сярки М. Т. Зоопланктон как компонент экосистемы Онежского озера. Петрозаводск: КарНЦ РАН, 1997. 112 с.
7. Куликова Т. П., Сярки М. Т. Особенности структуры и функционирования биологических сообществ под влиянием природных и антропогенных факторов. Структура и количественные показатели зоопланктона // Онежское озеро. Экологические проблемы. Петрозаводск: КарНЦ РАН, 1999. С. 191–211.
8. Куликова Т. П., Сярки М. Т. Влияние антропогенного эвтрофирования на распределение зоопланктона в Кондопожской губе Онежского озера // Водные ресурсы. 2004. Т. 31. № 1. С. 91–97.
9. Макарушин А. Биологический анализ качества вод. Л.: ЗИН АН СССР, 1974. 60 с.
10. Методические рекомендации по сбору и обработке материалов в гидробиологических исследованиях на пресноводных водоемах. Зоопланктон и его продукция. Л.: ГосНИОРХ, 1984. 33 с.
11. Смирнова Т. С. Планктонные коловратки и ракообразные // Зоопланктон Онежского озера. Л.: Наука, 1972. С. 145–159.
12. Сярки М. Т. Зоопланктон // Биоресурсы Онежского озера. Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2008. С. 54–67.
13. Shannon C. E., Weaver W. The mathematical theory of communication. Urbana: Univ. Illinois Press, 1949. 117 p.

ЛЮДМИЛА АЛЕКСАНДРОВНА СЕРГИЕНКО

кандидат биологических наук, доцент кафедры ботаники и физиологии растений эколого-биологического факультета, Петрозаводский государственный университет  
saltmarsh@mail.ru

## О МОРФОЛОГИЧЕСКОЙ ИЗМЕНЧИВОСТИ В РОДЕ ГОНКЕНИЯ СЕМЕЙСТВА ГВОЗДИЧНЫХ (*HONCKENYA* ERCH. СЕМЕЙСТВА *CARYOPHYLLACEAE*)

Виды рода Гонкения находятся в стадии активного видообразования из-за нестабильных условий существования на приморской полосе. На основании изучения морфологических признаков растений и строения поверхности семян приводится новая трактовка объема рода *Honckenia* Erch.

Ключевые слова: приморская полоса, галофиты, поверхность семян, видообразование

### ВВЕДЕНИЕ

Флора Арктики является наиболее молодой из современных зональных флор, поэтому вопрос о времени ее становления (вероятно, конец плиоцена) может быть разрешен более или менее достоверно [8], [9], [10]. Значительно сложнее вопрос о времени и месте происхождения отдельных элементов, слагающих эту флору. Нет никакого сомнения в том, что их возраст различен. Многие весьма характерные арктические виды возникли в горах задолго до становления арктической флоры и вошли в ее состав уже вполне сформировавшись. Немало других видов Арктики имеют гибридное происхождение, но они могли возникнуть как до становления арктической флоры, так и во время этого процесса или даже после него, в течение плейстоцена. Галофитный флористический комплекс, к которому относится облигатный псаммогалофит *Honckenia* Erch., является одним из компонентов, слагающих арктическую флору, он распространен на песчаных и илистых осушках, периодически затапливаемых во время прилива по всему арктическому побережью. Именно на

приморской полосе многие виды находятся в процессе активного видообразования.

Первый вид рода *Honckenia* Ehrh. был описан К. Линнеем в 1753 году под названием *Arenaria peplodes* L. с побережья Северной Европы. Позднее он был перенесен в род *Minuartia* Hiern. с бинарным названием *M. peplodes* (L.) Hiern. Й. Матфельд разделил этот вид на 3 подвида: subsp. *robusta* (Fernald) Mattf., subsp. *major* (Hook.) Mattf. и subsp. *latifolia* Mattf. [14]. В последнем подвиде он выделил 2 разновидности: var. *typica* (Will.) Mattf. и var. *diffusa* (Hornem.) Mattf. Другой вид рода – *Honckenia oblongifolia* Torr. Et Gray – описан в 1838 году с тихоокеанского побережья Северной Америки. Растения, определяемые как *H. oblongifolia*, ряд авторов рассматривают в качестве подвида циркумполярного вида *H. peplodes* (L.) Ehrh. [3], [13], [1].

Е. Г. Победимова на основании различий в размерах растений, длине междоузлий, окраске и количестве семян в коробочке разделяет род *Honckenia* на 5 видов (табл. 1): *H. diffusa* (Hornem.) A. Löve, *H. oblongifolia*, *H. maritima* (Rafin.) Rafin., *H. peplodes* и *H. frigida* Pobed. [3]. Во «Флоре Ев-

ропы» [12] для северо-западного побережья Европы указывается *H. peplodes*, а для арктического побережья и Исландии приводится его разновидность – *var. diffusa* (Hornem.) Ostenf. [5].

Е. Гультен считает род *Honckenya* монотипным, состоящим из одного полиморфного вида *H. peplodes* с 3 подвидами: *subsp. peplodes*, *subsp. diffusa* (Hornem.) Hult. и *subsp. major* (Hook.) Hult. [13]. В. В. Петровский в «Арктической флоре СССР» в трактовке рода *Honckenya* следует Гультену [1].

## МАТЕРИАЛ И МЕТОДЫ

Для установления более четкого объема рода *Honckenya* Erch. кроме личной коллекции (120 гербарных листов) нами были изучены гербарные образцы (250 гербарных листов) из коллекции Ботанического института РАН им. В. Л. Комарова из приморских районов Российской Арктики, Дальнего Востока и зарубежных стран, а также немонтированные сборы сотрудников лаборатории растительности Крайнего Севера (270 гербарных листов). Были сделаны препараты строения поверхности семян для сканирующего микроскопа (50 постоянных препаратов), 70 микрофотографий поверхности семени. Помимо морфометрического анализа признаков ряда органов (длина междоузлий, форма и размер пластинки листа, толщина стенок плода-коробочки, форма, цвет и типы поверхности семян), с помощью сканирующего микроскопа JSM-35 были

изучены наиболее консервативные и устойчивые признаки генеративной сферы – строение поверхности семян.

## РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Среди изученных образцов рода *Honckenya* нами выделены 2 группы, различающиеся по размеру, форме и цвету семян. У растений первой группы семена округло-овальные, (2,3)2,5–3,8(4,2) мм длиной, красновато-коричневые, с удлинненным носиком; ширина семени в нижней части меньше его длины. К данной группе относятся образцы с арктического побережья от Кольского полуострова до Чукотского, а также с побережий Камчатки, Сахалина, Курильских островов, севера Японии. В пределах этой группы наблюдаются вариации по размеру и цвету семян: образцы с Тазовского полуострова, из северных районов Камчатки, устья р. Анадырь, о. Б. Раутан имеют семена до 3,8 мм длиной и более темную окраску. Еще более крупные семена, до 4,2 мм длиной, округло-эллиптические, интенсивно-красновато-коричневые имеют растения с залива Св. Лаврентия, из южных районов Камчатки, о. Сахалин и Курил (о. Шиадокотан). Мелкие, 2,3–2,8 мм длиной, округло-овальные, светло-красновато-коричневые семена имеют растения с юго-восточного побережья Чукотского моря (окрестности п. Нутепельмен, оз. Аччен) и с побережья Охотского моря (устье р. Тахтамы). На побережье Берингова пролива данная группа представлена всеми тремя вариациями.

Таблица 1

Точка зрения монографов рода *Honckenya* Erch. на объем таксона

Е. Г. Победимова [3]		Е. Гультен [13]		«Панарктическая флора» [4]	
<i>H. diffusa</i> (Hornem.) A. Löve	северное побережье Северной Америки, Гренландия, Шпицберген, Исландия, север Европы, северное побережье Азии до устья Енисея	<i>Honckenya peplodes</i> subsp. <i>peplodes</i>	атлантическое побережье Европы от Португалии до Северной Норвегии, Великобритания и Фарерские острова, побережье Балтийского моря	<i>Honckenya peplodes</i> (L.) Ehrh/ subsp. <i>peplodes</i>	атлантическое побережье Европы от Португалии до Северной Норвегии, Великобритания и Фарерские острова, побережье Балтийского моря
<i>H. oblongifolia</i> Torr. et Gray	побережья Берингова и Охотского морей, полуостров Камчатка, Сахалин, север Японии, тихоокеанское побережье Северной Америки	<i>Honckenya peplodes</i> subsp. <i>major</i> (Hook.) Hult.	острова и побережья Тихого океана	<i>Honckenya peplodes</i> (L.) Ehrh. subsp. <i>major</i> (Hook.) Hultén = <i>Honckenya oblongifolia</i> Torr. et A.Gray	амфиацифический вид (вне арктических побережий европейской Арктики)
<i>H. peplodes</i> Ehch.	побережья Северного и Балтийского морей, атлантическое побережье Европы, Великобритания и Фарерские острова	<i>Honckenya peplodes</i> subsp. <i>diffusa</i> (Hornem.) Hult.	циркумполярно по всей Арктике	<i>Honckenya peplodes</i> (L.) Ehrh subsp. <i>robusta</i> (Fernald) Hultén	внеарктические побережья северо-восточной Северной Америки
<i>H. maritima</i> (Rafin.) Rafin.	атлантическое побережье Северной Америки от Новой Англии до Нью-Джерси			<i>Honckenya peplodes</i> (L.) Ehrh. subsp. <i>diffusa</i> (Hornem.) Hultén ex V. V. Petrovsky	циркумполярно по всей Арктике
<i>H. frigida</i> Pobed.	побережья моря Лаптевых, Восточно-Сибирского, Чукотского и Берингова морей				

У растений второй группы семена округло-широкояйцевидные, крупные, 3,8–4,8 мм длиной, темно-красно-коричневые, с коротким носиком; ширина семени в нижней части примерно равна его длине. К этой группе принадлежат растения, произрастающие по побережьям Балтийского моря (окрестности г. Риги), Финского залива (окрестности п. Янтарное, г. Усть-Нарва, г. Пярну) и на южном побережье Белого моря (Княжая губа и окрестности п. Кандалакша).

Для циркумполярной арктобореальной *H. diffusa* характерны семена, относящиеся к первой группе (довольно мелкие, красно-коричневые); более крупные семена, до 3,8–4,2 мм длиной, встречаются лишь у некоторых экземпляров из восточной части ареала. Для *H. peplodes*, произрастающей на атлантическом побережье Европы от Португалии до Северной Норвегии, на побережье Великобритании, Фарерских островах и на побережье Балтийского моря, характерны семена, относящиеся ко второй группе (крупные, темно-красно-коричневые).

Нами также изучалась микроструктура поверхности семян растений рода *Honckenia*, в результате чего были выделены 2 типа микроструктуры (табл. 2). Первый тип характеризуется высокими, плотно расположенными бугорками неправильной, отчасти трапецевидной формы, большей частью линейно ориентированными к носу семени, разделенными узкими, крутыми, «каньонообразными» бороздками. Изредка встречаются растения с семенами, имеющими более широкие и неясно очерченные бороздки (рис. 1, 2). Семена с микроструктурой первого типа имеют растения с побережья Кольского полуострова, из устья р. Бель (Ямало-Ненецкий автономный округ), с Тазовского полуострова, из губы Буор-хая, с Чукотского полуострова (окрестности п. Апапельхино, Нутепельмен, Уэлен и Лаврентия, оз. Аччен), с побережья Охотского моря, из северных и южных районов Камчатки, а также с Сахалина.



Рис. 1. Первый тип микроструктуры поверхности семени: Микроструктура поверхности семени *Honckenia diffusa* (Hornem.) A. Löve. По образцу: Кемский уезд Княжая губа, остров в заливе, 9 VII 1917, М. Быков. Сканирующий микроскоп JSM-35, x200

Таблица 2  
Морфологическая характеристика видов *Honckenia oblongifolia* Torr. et Gray и *Honckenia peplodes* s. l.

Признаки	<i>Honckenia oblongifolia</i> Torr. et Gray	<i>Honckenia peplodes</i> s. l.
длина междоузлий	1–3(4,5) см длиной	0,7–2,5 см длиной
форма и размер пластинки листа	15–20 мм длиной; 6–10(15) мм шириной	(7)10–15(25) мм длиной, 6–10 мм шириной, расположенные крест-накрест и сученные
типы поверхности семян	высокие, плотно расположенные бугорки неправильной, отчасти трапецевидной формы, большей частью линейно ориентированные к носу семени, разделенные узкими, крутыми, «каньонообразными» бороздками	выпуклые округлые бугорки, линейно ориентированные к носу семени; иногда наблюдается чередование выпуклых и округлых бугорков с длинными и менее высокими. Бороздки между бугорками очень широкие и слабо очерченные
коробочка	конусовидная, с тонкими просвечивающими стенками	шаровидная, с толстыми непросвечивающими стенками
форма, цвет и число семян	6–12, округло-овальные, красновато-коричневые	5–10, округло-широкояйцевидные, темно-красно-коричневые
2n	68; 68–70 (4x?)	48; 64–70 68 (4x?)
распространение	амфиазиатический вид	циркумполярный вид

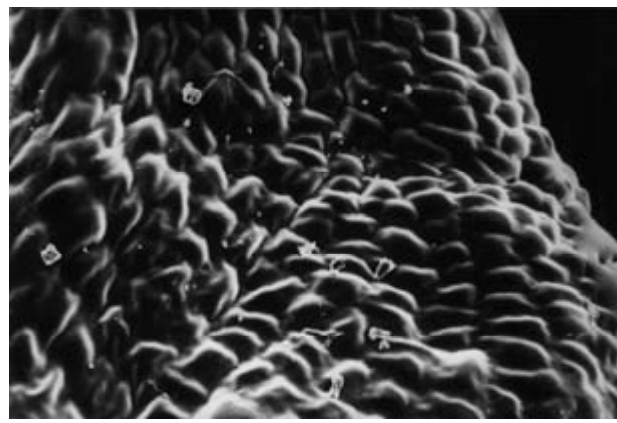


Рис. 2. Первый тип микроструктуры поверхности семени: Микроструктура поверхности семени *Honckenia diffusa* (Hornem.) A. Löve. По образцу: Сахалин, in littore Korsakov, № 476, авг. 1901, leg. Paurie. Сканирующий микроскоп JSM-35, x200

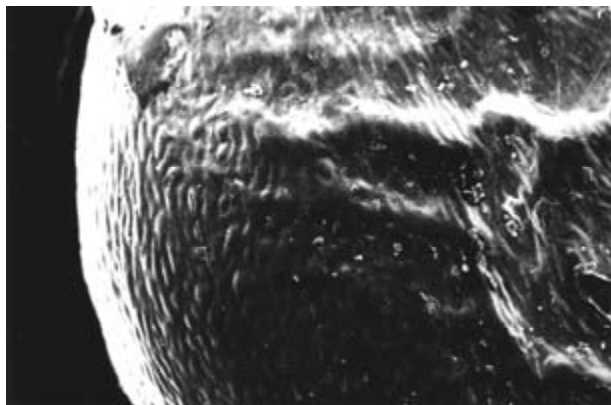


Рис. 3. Второй тип микроструктуры поверхности семени: Микроструктура поверхности семени *Honckenya peploides* (L.) Ehrh. По образцу: ст. Дюны, побережье Финского залива, на песке, 8 IX 1912, Ю. Д. Цинзерлинг. Сканирующий микроскоп JSM-35, x54

Второй тип микроструктуры характеризуется выпуклыми округлыми бугорками, линейно ориентированными к носику семени; иногда наблюдается чередование выпуклых и округлых бугорков с длинными и менее высокими. Бороздки между бугорками очень широкие и слабо очерченные (рис. 3). Семена с микроструктурой второго типа имеют растения с атлантического побережья Западной Европы, побережья Балтийского моря и южного побережья Белого моря. Для *H. diffusa* характерна микроструктура поверхности семени первого типа, для *H. peploides* – второго типа.

В качестве *H. oblongifolia* были описаны образцы с тихоокеанского побережья Северной Америки (залив Фука), отличающиеся от *H. peploides* высокими, 15–40 см, стеблями, крупными продолговато-эллиптическими листьями, ланцетовидно-яйцевидными чашелистиками (у *H. peploides* они большей частью яйцевидные). *H. diffusa* (Hornem.) A. Löve, описанная из Гренландии, является, по мнению А. Лёве, арктическим циркумполярным видом, отличающимся от *H. peploides* более крупными размерами всего растения, широкоэллиптическими листьями, междоузлиями до 3 см длиной и ланцетовидно-яйцевидными чашелистиками. На протяжении всего ареала *H. oblongifolia*, особенно на побережьях Камчатки, Сахалина и Шиадокотана, в популяциях этого вида встречаются экземпляры, неотличимые от типичных представителей *H. diffusa* как по внешнему облику, форме и цвету семян, так и по микроструктуре поверхности семян (наблюдаются вариации в пределах первого типа по форме и величине бугорков и по размерам, ширине и ориентированности бороздок). Более крупные размеры некоторых растений, по-видимому, связаны с благоприятными условиями их произрастания. На сходство растений с арктического и тихоокеанского побережий указывали авторы при первоописании *H. oblongifolia*.

*H. frigida* описана Победимовой с побережья Берингова пролива (окрестности п. Уэлен). По мнению автора, она отличается от *H. diffusa* об-

ратнойцевидными или обратноланцетными мелкими, 10–12 мм длиной, 3–5 мм шириной, листьями (у *H. diffusa* листья продолговато-эллиптические, до 22 мм длиной, 3–10 мм шириной), более короткими, 4–6 мм длиной (а не 5–10 мм, как у *H. diffusa*), цветоножками, более мелкими, 3 мм длиной, и более многочисленными, до 20 (а не 8–12), семенами. Победимова отмечает, однако, что у растений *H. frigida* на окраинах ее западночукотско-американского ареала наблюдаются отклонения от типа как по форме листьев, так и по цвету и размерам семян [3]. При изучении гербарных экземпляров, этикетированных как *H. frigida*, нами на протяжении всего ареала распространения *H. frigida* выявлены многочисленные отклонения изученных растений от типовых образцов. Микроструктура поверхности семян растений, относимых к *H. frigida*, варьирует в пределах первого типа.

На основании просмотра обширного гербарного материала по роду *Honckenya* Erch. нами были сделаны выводы в отношении видового состава рода *Honckenya*, отличающиеся от трактовки рода Победимовой [3] и Петровским [1] (см.: [5], [6]).

Приводим синонимику принимаемых видов.

1. *Honckenya oblongifolia* Torr. et Gray, 1838, Fl. North Amer. 1:176; Побед. 1960, Бот. мат. (Ленинград), 20:151; Череп. 1981, Сосуд. раст. СССР: 163. – *Arenaria peploides* var. *diffusa* Hornem. 1821, Dansk. Oecon. Plantel. ed. 3, 1:501; Fern. 1909, Rhodora, 11:114. – *Minuartia peploides* subsp. *latifolia* var. *diffusa* (Hornem.) Mattf. 1922, Feddes Repert. (Beih.), 15:10. – *Honckenya peploides* subsp. *diffusa* (Hornem.) Hult. 1937, Fl. Aleut. Isl.: 173 (sine basionymo); Петровский, 1971, в Аркт. фл. СССР, 6:71; Юрцев и др. 1979, Бюлл. Моск. общ. исп. прир. отд. биол., 84, 5, 2:75. – *H. peploides* subsp. *major* (Hook.) Hult. 1937, 1. c.: 171; Петровский, 1971, цит. соч.: 74. – *H. diffusa* (Hornem.) A. Löve, 1950, Bot. Not. (Lund), 1: 39; Кузен. 1956, во Фл. Мурм. обл. 3:56; Побед. 1960, цит. соч.: 148; Череп. 1981, цит. соч.: 163. – *H. frigida* Pobed. 1960, Бот. мат. (Ленинград), 20:155.

Растение (7)10–30(35) см высотой. Листья плотные, мясистые, продолговато-эллиптические, иногда широколанцетные, 15–20 мм длиной, 6–10(15) мм шириной. Междоузлия 1–3(4,5) см длиной. Цветки на цветоножках 5–20 мм длиной. Коробочка конусовидная, реже шаровидная, с тонкими просвечивающими стенками. 6–12 семян, округло-овальные, красновато-коричневые, иногда (юго-восток Чукотского полуострова) светло-красновато-коричневые, (2,3)2,5–3,8(4,2) мм длиной, с удлинненным носиком; ширина семени в нижней части меньше его длины. Микроструктура поверхности семени первого типа (у растений с Чукотского полуострова наблюдается варьирование в размерах бугорков и бороздок). Описан с тихоокеанского побережья Северной Америки (залив Фука). Тип в Нью-Йорке (NY). Псаммоэв-



галофит, произрастающий на песчаных почвах с удовлетворительным дренажем. Затопление морскими водами выносит непродолжительное время. Как показали наши исследования, определяющим фактором, влияющим на распространение вида по территории приморской полосы, является способность вида выдерживать постоянное засыпание перевеваемым песком. Вместе с *Leymus vilosissimus*, *Mertensia maritima* первым поселяется на песчаных дюнах, но никогда не образует сомкнутых сообществ. Произрастает на побережьях Исландии, Шпицбергена, северном побережье Западной Европы с прилежащими островами, западном и восточном побережьях Белого моря, северном и тихоокеанском побережьях Азии и Северной Америки.

2. *Honckenia peploides* (L.) Ehrh. 1788, Beitr. Naturk. 2 : 180; Побед. 1960, Бот. мат. (Ленинград), 20 : 158; Halliday, 1964, in Fl. Europ. 1 : 132; Лашенкова, 1976, во Фл. Сев.-Вост. евр. ч. СССР, 2 : 220; Череп. 1981, Сосуд. раст. СССР : 163. – *Arenaria peploides* L. 1753, Sp. Pl. : 423; Fern. 1909, Rhodora, 11 : 113. – *Ammodenia peploides* Rupr. 1846, Beitr. Pflz. Russ. Reichs. 2 : 25; Горшк. 1936, во Фл. СССР, 6 : 517. – *Minuartia peploides* subsp. *latifolia* var. *typica* (Will.) Mattf. 1922, Feddes Repert. (Beih.), 15 : 10.

Растение 7–25 см высотой, с плотными суккулентными листьями, широкоэллиптическими, иногда почти округлыми, (7)10–15(25) мм длиной, 6–10 мм шириной, довольно часто (в южных частях ареала и на побережье Балтийского моря) крест-накрест расположенными и скученными. Междоузлия короткие, 0,7–2,5 мм длиной. Цветки на цветоножках 3–7 мм длиной. Коробочка шаровидная, с толстыми непросвечивающими стенками, с 5–12 округло-широкояйцевидными семенами, темно-красно-коричневыми, 3,8–4,8 мм длиной, с коротким носиком; ширина семени в нижней части примерно равна его длине. Микро-

структура поверхности семени второго типа. Описан с побережий Северной Европы, тип в Лондоне (LINN). Псаммоэгаллофит, произрастает на песчаных, песчано-галечных берегах морей.

Распространен на атлантическом побережье Европы от Португалии до Северной Норвегии, на побережьях Великобритании и Фарерских островов, побережье Балтийского моря, южном побережье Белого моря.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, на основании изучения гербарного материала мы пришли к выводу об отсутствии различий между *H. oblongifolia*, *H. diffusa* и *H. frigida* по всем признакам. Видовые признаки *H. diffusa* находятся в пределах варьирования *H. oblongifolia* и встречаются по всему арктическому циркумполярному ареалу *H. diffusa*. Мы не считаем возможным различать эти виды в качестве самостоятельных и *H. frigida* и *H. diffusa* включаем в синонимы к *H. oblongifolia*. Приоритетным является более раннее название *H. oblongifolia*. Циркумполярный арктобореальный вид *H. oblongifolia* представляет собой, по-видимому, первичную предковую форму, из которой во время бореальных трансгрессий моря и связанных с этим изменений климата выделились географические формы, принятые Е. Г. Победимовой как виды *H. diffusa* и *H. frigida* [3]. Растения, произрастающие по берегам Атлантического и Тихого океанов, сходны по форме листьев, количеству семян в коробочке и их размерам, по цвету и структуре поверхности семени и представляют собой, очевидно, конвергентные формы, возникшие в результате одинаковых условий существования.

Необходимо подчеркнуть внешнее габитуальное сходство некоторых экземпляров *H. peploides* и *H. oblongifolia* при различии в форме, цвете и структуре поверхности семени.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Арктическая флора СССР. М.; Л.: Изд-во АН СССР, 1971. Т. 6.
2. Камелин Р. В. Лекции по систематике растений. Главы теоретической систематики растений. Барнаул: Азбука, 2004. 228 с.
3. Победимова Е. Г. Обзор рода *Honckenia* Erch. // Ботанические материалы Гербария Ботанического института АН СССР. Т. 20. М.; Л., 1960. С. 125–138.
4. Проект Панарктическая флора [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://www.binran.ru/projects/paf/index.htm>.
5. Сергиенко Л. А. Заметки об арктических приморских видах рода *Honckenia* Ehrh. (*Caryophyllaceae*) // Новости систематики высших растений. Т. 22. Л.: Наука, 1985. С. 88–94.
6. Сергиенко Л. А. Флора и растительность побережий Арктики и сопредельных территорий. Петрозаводск: Изд-во ПетрГУ, 2008. 225 с.
7. Скворцов А. К. Становление современного понимания вида // Совещание по объему вида и внутривидовой систематике. Л.: Наука, 1967. С. 16–18.
8. Толмачев А. И. Автохтонное ядро арктической флоры и ее связи с высокогорными флорами Северной и Центральной Азии // Проблемы ботаники. М.; Л.: Изд-во АН СССР, 1962. Вып. 6. С. 55–65.
9. Цвелев Н. Н. Проблемы теоретической морфологии и эволюции высших растений. М.; СПб.: Товарищество научных изданий КМК, 2005. 407 с.
10. Юрцев Б. А., Толмачев А. И., Ребристая О. В. Флористическое ограничение и разделение Арктики // Арктическая флористическая область. Л.: Наука, 1978. С. 9–104.
11. Flora Europaea. Vol. 1–2. Cambridge: Univ. Press, 1964–1968.
12. Halliday G. Flora Europea. Vol. 1. 1964. P. 132.
13. Hulten E. Flora of Alaska and neighboring territories. Stanford, 1968. 1008 p.
14. Mattfeld J. Feddes Repertorium. Vol. 15. Vien, 1922. P. 10.

УДК 581.1.036

**ЕВГЕНИЯ АНАТОЛЬЕВНА СПИРИДОНОВА**

аспирант Института биологии, Карельский научный центр РАН

*s-ev-a@yandex.ru***МАРИНА ИВАНОВНА СЫСОЕВА**

доктор биологических наук, доцент, главный научный сотрудник лаборатории экологической физиологии растений Института биологии, Карельский научный центр РАН

*sysoeva@krc.karelia.ru***ЕЛЕНА ГЕОРГИЕВНА ШЕРУДИЛО**

кандидат биологических наук, старший научный сотрудник лаборатории экологической физиологии растений Института биологии, Карельский научный центр РАН

*sherudilo@krc.karelia.ru***ВЛИЯНИЕ ЕЖЕСУТОЧНЫХ КРАТКОВРЕМЕННЫХ СНИЖЕНИЙ ТЕМПЕРАТУРЫ И ФОТОПЕРИОДА НА РАЗВИТИЕ ДЕКОРАТИВНЫХ РАСТЕНИЙ**

Исследовано влияние 2- и 6-часовых ежесуточных снижений температуры в условиях фотопериодов 8, 12, 16 и 24 ч на бутонизацию и цветение петунии и бархатцев. Показано, что ежесуточные кратковременные снижения температуры значительно ускоряют развитие декоративных растений (петуния, бархатцы) в условиях короткого фотопериода. С увеличением продолжительности фотопериода эффект ускорения снижается, а при круглосуточном освещении отсутствует.

Ключевые слова: *Tagetes erecta*, *Petunia x hybrida*, бутонизация, цветение, фотопериод, кратковременное снижение температуры

Свет и температура входят в число важнейших факторов, регулирующих развитие растений на протяжении всего жизненного цикла. Наиболее распространенными приспособительными онтогенетическими реакциями растений к этим факторам являются термопериодизм и фотопериодизм [5], [8], [27]. Влияние длины дня на индукцию цветения достаточно хорошо изучено [1], [6], [16], [18]. Однако исследования в области влияния температуры на фотопериодическую реакцию показали, что растения способны реагировать на изменение длины дня только в определенных пределах температур и многие типичные длиннодневные и короткодневные виды при изменении температуры могут зацвести в условиях неблагоприятной для цветения длины дня [4], [18], [23], [24]. Кроме того, изменения в суточной температуре могут оказывать влияние на скорость перехода к цветению. Так, показано, что у арабидопсиса высокие ночные температуры более эффективны для цветения, чем дневные [25], у орхидных высокие дневные температуры способствуют зацветанию растений [10].

Как в природе, так и в условиях защищенного грунта достаточно часто встречаются кратковременные (часовые) ежесуточно повторяющиеся действия низких положительных закаливающих температур (ДРОП), которые вызывают у растений морфогенетический эффект, приводя к их компактности [20], а также способствуют повышению холодоустойчивости [3]. Влияние ежесуточных снижений температуры на скорость развития растений изучено недостаточно, и полученные в литературе данные противоречивы. Имеются данные об отсутствии влияния 2-часового ДРОП на количество листьев у растения огурца при фотопериоде 18 ч [13], [14] и на время наступления цветения бегонии и поинсеттии в условиях короткого фотопериода [20]. При коротком фотопериоде снижение температуры в суточном цикле на 2–10 °C также не оказало влияния на количество листьев у хризантемы [17], а 2-, 4- и 8-часовые низкотемпературные воздействия не влияли на количество листьев у поинсеттии [26]. В то же время отмечено ускорение начала цвете-

ния при ДРОП-воздействиях (1,5–3 ч) в условиях длинного фотопериода у бегонии, пеларгонии, петунии, сальвии, каланхое и розы [22]. Рождественская бегония на 2 дня быстрее зацвела при кратковременном снижении температуры в ночной период по сравнению с воздействием в начале светового дня [9]. Противоречивость полученных данных объясняется тем, что эффективность ДРОП-воздействия напрямую зависит от величины, продолжительности, времени воздействия и биологических особенностей вида [2], [12]. Кроме того, установлено, что показатели репродуктивного развития ориентированы на определенное время суток [2], а также выявлена разнокачественная реакция на ДРОП короткодневных и длиннодневных видов [21].

Целью настоящей работы было изучить влияние ежесуточных кратковременных снижений температуры на развитие декоративных растений в условиях разных фотопериодов.

## МАТЕРИАЛ И МЕТОДИКА

Работа выполнена на декоративных видах – длиннодневных растениях (ДДР) петунии (*Petunia x hybrida*, сорт Стелларис) и нейтральнодневных растениях (НДР) бархатцев (*Tagetes erecta*, сорт Купидон).

Семена высевали в почвенно-песчаный грунт (2:1) и выращивали в камерах искусственного климата ВКШ-73 с выдерживанием одинакового суточного светового интеграла 5,27 моль/сут при фотопериодах 8, 12, 16 и 24 ч и интенсивностях света 150, 100, 75 и 50 Вт/м<sup>2</sup> соответственно. Относительная влажность воздуха составляла 60–70 %, температура почвы соответствовала температуре воздуха, спектральный состав света – облучению лампами ДРЛ-400. Полив растений осуществляли ежедневно питательным раствором Кнопа с добавлением микроэлементов, рН – 6,2–6,4.

Пикировку рассады проводили на стадии первой пары настоящих листьев (бархатцы) и третьей пары листьев (петуния). Далее в течение месяца все растения выращивали при оптимальной температуре 22 °С. По достижении фазы 3–4 листьев (бархатцы) и 9–10 листьев (петуния) растения контрольного варианта оставляли при 22 °С, а опытные растения в течение 6 суток подвергали ежесуточным снижениям температуры до 12 °С на 2 или 6 ч (опытные варианты ДРОП\_2 и ДРОП\_6) в конце ночного периода или до завершения 24-часового цикла при круглосуточном освещении.

Для изучения последствий экспериментальных температурных обработок контрольные и опытные растения были высажены в середине июня в открытый грунт, где они произрастали до начала сентября. Проводили регулярные наблюдения за генеративным развитием по следующим фазам: 1) фаза бутонизации – фиксировали момент начала бутонизации, который оценивали

по количеству окрашенных бутонов у петунии и бутонов диаметром более 5 мм у бархатцев; 2) фаза цветения – фиксировали момент начала цветения, когда зацвело 10 % от общего числа растений в каждом варианте опыта, и наступление 100-процентного цветения. Повторность опыта в пределах варианта 35–40-кратная.

## РЕЗУЛЬТАТЫ

**Петуния.** По сравнению с контролем воздействие 2-часовых кратковременных снижений температуры на стадии рассады в условиях короткого (8 ч) фотопериода на 2 недели ускорило начало бутонизации и наступление цветения у растений петунии (табл. 1). Сходное влияние кратковременных снижений температуры наблюдалось в условиях нейтрального (12 ч) и длинного (16 ч) фотопериодов, но в этом случае образование бутонов произошло раньше на 1 неделю, а цветение ускорило на 3 суток (табл. 1, 2). С удлинением фотопериода эффект ускорения цветения отмечался при более длительном низкотемпературном воздействии (6 ч). В условиях круглосуточного освещения влияние кратковременных снижений температуры на наступление бутонизации и начало цветения не выявлено (табл. 1, 2). В условиях короткого фотопериода растения петунии во всех вариантах не достигли 100-процентного цветения даже к концу опыта (табл. 3). Однако при 12-часовом фотопериоде и при постоянном освещении 100-процентного цветения быстрее достигли растения, обработанные ДРОП, но при 16-часовом влиянии ДРОП-воздействия не выявлено (табл. 3).

Таблица 1

Влияние ежесуточных кратковременных снижений температуры на начало бутонизации петунии и бархатцев (сутки от посадки)

Варианты	Петуния (ДДР)				Бархатцы (НДР)			
	8 ч	12 ч	16 ч	24 ч	8 ч	12 ч	16 ч	24 ч
Контроль	98	65	65	53	64	52	54	62
ДРОП_2	82	59	65	55	62	50	59	62
ДРОП_6	98	59	57	55	62	54	55	62

Таблица 2

Влияние ежесуточных кратковременных снижений температуры на начало цветения петунии и бархатцев (сутки от посадки)

Варианты	Петуния (ДДР)				Бархатцы (НДР)			
	8 ч	12 ч	16 ч	24 ч	8 ч	12 ч	16 ч	24 ч
Контроль	99	74	68	58	98	74	80	76
ДРОП_2	92	65	72	56	94	70	84	81
ДРОП_6	99	65	65	63	94	74	80	85

Таблица 3

Влияние ежесуточных кратковременных снижений температуры на 100-процентное цветение петунии и бархатцев (сутки от посадки)

Варианты	Петуния (ДДР)				Бархатцы (НДР)			
	8 ч	12 ч	16 ч	24 ч	8 ч	12 ч	16 ч	24 ч
Контроль	–	102	119	83	–	95	99	110
ДРОП_2	–	92	120	73	–	101	103	110
ДРОП_6	–	102	121	76	–	101	99	110

Примечание. Прочерк означает, что 100-процентное цветение не наступило.

**Бархатцы.** Обработка растений ежесуточными кратковременными низкотемпературными воздействиями на 2 суток ускорила образование бутонов и наступление цветения по сравнению с контролем в условиях короткого и нейтрального фотопериодов, но при более продолжительном (16 и 24 ч) освещении этот эффект отсутствовал (табл. 1, 2). Как и растения петунии, бархатцы во всех вариантах не достигли 100-процентного цветения при коротком фотопериоде (табл. 3). В условиях всех остальных фотопериодов ДРОП-обработки не оказали влияния на наступление 100-процентного цветения (табл. 3).

## ОБСУЖДЕНИЕ

Проведенные исследования показали, что ДРОП-воздействие может приводить к ускорению развития растений, однако этот эффект зависит от биологических особенностей вида и длительности фотопериода. Выращивание рассады ДДР петунии и НДР бархатцев в условиях неблагоприятного для них короткого фотопериода привело к значительному замедлению в развитии: цветение наступило только через 2 месяца после высадки в открытый грунт, не наступило 100-процентное цветение. При этом ежесуточные кратковременные низкотемпературные обработки способствовали значительному ускорению начала бутонизации и цветения исследуемых видов. Полученные данные согласуются с результатами Чайлахяна и Ждановой [7], согласно которым охлаждение длиннодневных растений, находящихся в условиях короткого дня, во вторую половину темнового периода стимулировало переход к генеративному развитию. С удлинением фотопериода (12 и 16 ч) эффект ускорения сохранялся, но требовалось более продолжительное низкотемпературное воздействие.

Впервые нами показано, что с увеличением светового периода влияние ДРОП-воздействия на цветение и бутонизацию петунии и бархатцев снижалось и отсутствовало при круглосуточном освещении. Эти данные свидетельствуют о тесной связи температурного и фотопериодического путей регуляции, что отмечается в литературе [1]. Однако полученные нами результаты позво-

ляют говорить и об участии переменных температур в этих процессах.

Известно, что существует 4 основных пути перехода к цветению: иницируемые благоприятной длиной дня (фотопериодический контроль цветения), температурой (температурный путь), автономными механизмами (возрастной контроль цветения) или воздействием гиббереллинов (гормональный путь) [1]. Все они напрямую или косвенно связаны с уровнем экспрессии гена *FT* (*FLOWERING LOCUS T*) [1], [11], [15], который, по мнению Аксеновой с соавторами, может представлять собой молекулярную форму флоригена [1]. Его экспрессия или блокировка посредством различных сигналов (свет, температура) могут приводить к инициации или ингибированию цветения [1], [11], [15].

При этом одним из важнейших для однолетних и двулетних растений является температурный путь – продолжительное воздействие низкой температурой (яровизация) в условиях определенного фотопериода. Генетический механизм температурного пути достаточно хорошо изучен и связан с генами *VRN* (*VERNALIZATION* – гены яровизации). Их активация вызывает блокировку гена репрессии цветения *FLC* (*FLOWERING LOCUS C*), что, в свою очередь, ингибирует ген *FT*, ускоряя таким образом наступление цветения [1], [19], [28].

В нашем эксперименте растения подвергались действию кратковременных снижений температуры, которые ускорили развитие (начало бутонизации и цветения) ДДР и НДР не только в условиях благоприятных – длинного и нейтрального фотопериодов, но и неблагоприятного для развития короткого фотопериода. Полученные данные не позволяют соотнести механизм таких воздействий с общепринятым температурным путем, связанным с генами яровизации *VRN*, когда генеративное развитие иницируется длительными низкотемпературными обработками. Однако исследования последних лет показали, что существует иной путь, связанный с геном *SVP* (*SHORT VEGETATIVE PHASE* – ген, связанный с изменениями температуры), который напрямую (без участия *FLC*) контролирует экспрессию гена *FT* [19]. Именно этот механизм, по мнению Ли с соавторами [19], используется растением для контроля начала цветения при флуктуирующих температурах независимо от фотопериода. Таким образом, переход к цветению может параллельно контролироваться и фотопериодом, и температурой. Причем при неблагоприятном для перехода к цветению ДДР и НДР коротком фотопериоде в качестве альтернативного пути может выступать температурный путь регуляции, связанный с экспрессией гена *SVP*, которая вызывается перепадами суточной температуры.

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РФФИ № 10-04-00097.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Аксенова Н. П., Милыева Э. Л., Романов Г. А. Флориген обретает молекулярный облик. К 70-летию теории гормональной регуляции цветения // Физиология растений. 2006. Т. 53. № 3. С. 449–454.
2. Марковская Е. Ф., Сысоева М. И. Роль суточного температурного градиента в онтогенезе растений. М.: Наука, 2004. 119 с.
3. Марковская Е. Ф., Сысоева М. И., Шерудило Е. Г. Феномен ежесуточного кратковременного влияния низких закалывающих температур на жизнедеятельность растения // Онтогенез. 2008. Т. 39. № 5. С. 323–332.
4. Мошков Б. С. Актиноритмизм растений. М.: ВО «Агропромиздат», 1987. 272 с.
5. Радченко С. И. Температурные градиенты среды и растение. М.; Л.: Наука, 1966. 390 с.
6. Чайлахян М. Х. Регуляция цветения высших растений. М.: Наука, 1988. 559 с.
7. Чайлахян М. Х., Жданова Л. П. Влияние температуры на фотопериодизм растений // ДАН СССР. 1948. Т. 62. № 4. С. 549–552.
8. Adams S. R., Langton F. A. Photoperiod and plant growth: a review // J. Hort. Sci. & Biotechnol. 2005. Vol. 80. № 1. P. 2–10.
9. Bakken A. K., Moe R. Height and quality control in Christmas begonia by growth-retarding temperature regimes // Acta Agric. Scand. Sect. B, Soil and Plant Sci. 1995. Vol. 45. P. 283–292.
10. Blanchard M. G., Runkle E. S. Temperature during the day, but not during the night, controls flowering of *Phalaenopsis* orchids // Journal of Experimental Botany. 2006. Vol. 57. P. 4043–4049.
11. Blazquez M. A., Ahn J. H., Weigel D. A thermosensory pathway controlling flowering time in *Arabidopsis thaliana* // Nature Genetics. 2003. Vol. 33. P. 168–171.
12. Carvalho S. M. P., Noort van F., Rostma R., Heuvelink E. Possibilities for producing compact floricultural crop. Report 173. Wageningen UR Greenhouse Horticulture. Wageningen. March 2008. P. 68.
13. Grimstad S. O. The effect of a daily low temperature pulse on growth and development of greenhouse cucumber and tomato plants during propagation // Scientia Hort. 1993. Vol. 53. P. 53–62.
14. Grimstad S. O. Low-temperature pulse affects growth and development of young cucumber and tomato plants // J. Hort. Sci. 1995. Vol. 70. № 1. P. 75–80.
15. Halliday K. J., Salter M. G., Thingnaes E., Whitelam G. C. Phytochrome control of flowering is temperature sensitive and correlates with expression of the floral integrator FT // Plant Journal. 2003. Vol. 33. P. 875–885.
16. Handro W. On the flower initiation in *Streptocarpus nobilis* C. B. Clarke (Gesneriaceae) // Bol. Botânica Univ. S. Paulo. 1976. Vol. 4. P. 31–40.
17. Jensen H. E. K. Influence of degree and duration of DIF temperature periods on growth and flowering of *Dendranthema grandiflora* Tzvelev // Gartenbauwissenschaft. 1994. Vol. 59. № 6. P. 280–284.
18. Lang A. Physiology of flower initiation. // Encyclopedia of Plant Physiology. 1965. Vol. 15. № 1. P. 1380–1536.
19. Lee J. H., Yoo S. J., Park S. H., Hwang I., Lee J. C., Ahn J. H. Role of SVP in the control of flowering time by ambient temperature in *Arabidopsis* // Genes Dev. 2008. Vol. 21. P. 397–402.
20. Moe R., Heins R. D. Thermo- and photomorphogenesis in plants // Advances in Floriculture research. Agric. Univ. of Norway. Report № 6. 2000. P. 52–64.
21. Moe R., Willumsen K., Ihlebek I. H., Stupa A. I., Gromsrud N. M., Mortensen L. M. DIF and temperature drop responses in SDP and LDP, a comparison // Acta Hort. 1995. Vol. 378. P. 27–33.
22. Mortensen L. M., Moe R. Effects of various day and night temperature treatments on the morphogenesis and growth of some greenhouse and bedding plant species // Acta Hort. 1992. Vol. 327. P. 77–86.
23. Roberts R. H., Struckmeyer B. E. The effects of temperature and other environmental factors upon the photoperiodic responses of some of the higher plants // J. Agric. Res. 1938. Vol. 56. P. 633–646.
24. Roberts R. H., Struckmeyer B. E. Further studies of the effects of temperature and other environmental factors upon the photoperiodic responses of plants // J. Agric. Res. 1939. Vol. 59. P. 699–709.
25. Thingnaes E., Torre S., Ernstsén A., Moe R. Day and night temperature responses in *Arabidopsis*: effect on gibberellin and auxin content, cell size, morphology and flowering time // Annals of Botany. 2003. Vol. 92. P. 601–612.
26. Ueber E., Hendriks L. Effects of intensity, duration and the time of a temperature drop on growth and flowering of *Euphorbia pulcherrima* Willd. ex. Klotzsch // Acta Hort. 1992. Vol. 327. P. 33–37.
27. Went F. W. Plant growth under controlled conditions. 2. Thermoperiodicity in growth and a fruiting of the tomato // Am. J. Bot. 1944. Vol. 31. P. 135–150.
28. Zeevaart J. A. D. Leaf-produced floral signals // Current Opinion in Plant Biology. 2008. Vol. 11. P. 541–547.

УДК 591.133.2:599.323.4

**ЕВГЕНИЙ АЛЕКСАНДРОВИЧ ХИЖКИН**

аспирант Института биологии, Карельский научный центр РАН

*hizhkin84@mail.ru***ВИКТОР АЛЕКСАНДРОВИЧ ИЛЮХА**

доктор биологических наук, доцент, заведующий лабораторией экологической физиологии животных, Институт биологии, Карельский научный центр РАН, профессор кафедры молекулярной биологии, биологической и органической химии эколого-биологического факультета, Петрозаводский государственный университет

*ilyukha@bio.krc.karelia.ru***ТАТЬЯНА АНАТОЛЬЕВНА ЛОТОШ**

старший преподаватель кафедры фармакологии, организации и экономики фармации с курсами микробиологии и гигиены медицинского факультета, Петрозаводский государственный университет

*lotosh@petrsu.ru***ИРИНА АНАТОЛЬЕВНА ВИНОГРАДОВА**

доктор медицинских наук, доцент, заведующий кафедрой фармакологии, организации и экономики фармации с курсами микробиологии и гигиены медицинского факультета, Петрозаводский государственный университет

*irinav@petrsu.ru***ВЛАДИМИР НИКОЛАЕВИЧ АНИСИМОВ**

доктор медицинских наук, профессор, руководитель отдела канцерогенеза и онкогеронтологии, НИИ онкологии им. проф. Н. Н. Петрова Росмедтехнологий (г. Санкт-Петербург)

*aging@mail.ru*

## ОСОБЕННОСТИ РЕАГИРОВАНИЯ АНТИОКСИДАНТНЫХ ФЕРМЕНТОВ В ОРГАНАХ КРЫС НА НАРУШЕНИЕ ЦИРКАДИАНЫХ РИТМОВ НА РАЗНЫХ ЭТАПАХ ОНТОГЕНЕЗА

Исследовано влияние постоянного освещения, воздействие которого начиналось с одномесечного возраста и с возраста 14 месяцев, на активность антиоксидантных ферментов в различных органах и продолжительность жизни крыс. Установлено, что воздействие постоянного освещения, начиная с 14-месечного возраста, способно приводить к более позднему «старению» ферментативного компонента антиоксидантной системы, что, возможно, является одной из причин продления жизни животных.

Ключевые слова: постоянное освещение, антиоксидантные ферменты, продолжительность жизни

Чередование дня и ночи является важнейшим регулятором временной организации физиологических функций организма. Реакция организма на изменение световых режимов обусловлена работой эпифиза (шишковидного тела) [2], который является железой, запускающей процесс старения. Показано, что пересадка эпифиза старых мышей молодым является причиной ускоренного старения последних [12], а его удаление может приводить как к преждевременному старению, так и к продлению жизни. Было установлено, что эпифизэктомия в 14-месечном возрасте, в отличие от более ранних или более поздних возрастов, приводит к увеличению продолжительности жизни млекопитающих [13].

Наряду с удалением железы для изменения деятельности эпифиза используют постоянное

освещение. Согласно гипотезе «циркадианной деструкции», воздействие света в ночные часы, как и удлинение светового дня, нарушают эндогенный суточный ритм организма, что приводит к изменению адаптационных реакций, отражается на состоянии здоровья и продолжительности жизни животных [7], [15].

Свободнорадикальная теория старения предполагает, что свободные радикалы, к которым относятся и некоторые активные формы кислорода (АФК), вызывают повреждение макромолекул, что в конечном счете приводит к старению [10]. Обнаружено, что продолжительность жизни животных отрицательно коррелирует с уровнем основного метаболизма и аутоокисляемостью тканей [1], [14]. Одним из способов защиты клеток от действия АФК является повышение (восстановление) ак-

тивности антиоксидантных ферментов (АОФ), в том числе и в результате их синтеза *de novo* [9].

Целью нашего исследования было изучение влияния постоянного освещения, воздействие которого начиналось в возрасте 1 и 14 месяцев, на активность АОФ – супероксиддисмутазы (СОД) и каталазы, а также продолжительность жизни крыс.

## МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

Опыт проводили на самцах и самках крыс, содержащихся на стандартном рационе вивария со свободным доступом к воде. Были сформированы 3 группы животных: первая содержалась в стандартных условиях освещения в течение всей жизни (12 часов свет / 12 часов темнота; LD) и являлась контрольной, вторая и третья – при постоянном освещении с возраста 1 месяца (LL-1) и 14 месяцев (LL-14) соответственно. Группы LD и LL-1 состояли из 5 животных (соотношение самцов и самок 2:3), в группе LL-14 было 6 крыс (3:3).

У крыс первых двух групп (LD и LL-1) образцы тканей печени, почек, сердца, легких, селезенки и скелетной мышцы отбирали после декапитации в 6, 12, 18 и 24 месяца, у животных третьей группы (LL-14) – в 15, 18, 24 и 30 месяцев. Определение активности ферментов проводили спектрофотометрически: СОД по модифицированной адренохромной методике [11], каталазы – по количеству разложенной перекиси водорода [8]. Оценивали различные показатели, характеризующие продолжительность жизни в каждой из групп: среднюю продолжительность жизни (СПЖ), СПЖ последних 10 % крыс и максимальную продолжительность жизни (МПЖ) животных. Полученные данные обрабатывали общепринятыми методами вариационной статистики. Сравнение показателей у крыс одного возраста проводили попарно (LD – LL-1, LD – LL-14 и LL-1 – LL-14) с применением непараметрического критерия Вилкоксона – Манна – Уитни [5]. Работа выполнена с соблюдением международных 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», «Биоэтических правил проведения исследований на человеке и животных».

## РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Ранее нами было показано, что у крыс, которые с месячного возраста содержались в условиях постоянного освещения, активность АОФ возрастала до определенного уровня, а затем постепенно или резко, в зависимости от органа, снижалась – происходило «старение» ферментативного компонента антиоксидантной системы [3], [4]. Особенно отчетливо эти изменения проявлялись в сердце, почках и скелетной мышечной ткани.

В настоящем исследовании установлено, что с возрастом происходит в разной степени выражен-

ное рассогласование в работе ферментов антиоксидантной системы у крыс первых двух групп. В печени и почках отмечено снижение активности СОД к 12 месяцам с последующим увеличением к 18-месячному возрасту, тогда как активность каталазы, наоборот, повышалась у 12-месячных крыс и снижалась к 18 месяцам. Активность СОД в этих органах у 12-месячных крыс имела минимальное значение, а каталазы – максимальное (рис. 1, 2). В отличие от этого, у крыс, содержащихся при постоянном освещении с 14 месяцев, отмечены синхронные изменения активности ферментов – при увеличении активности СОД увеличивалась и активность каталазы. Активность СОД и каталазы печени и почек у этой группы животных по сравнению с крысами первых двух групп повышалась к 24-месячному возрасту и затем снижалась к 30 месяцам (рис. 1, 2).

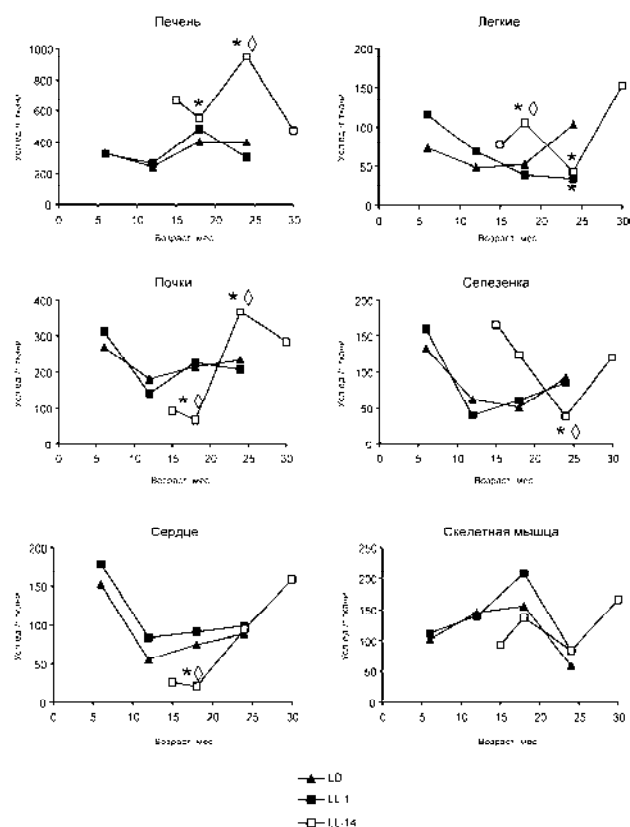


Рис. 1. Возрастные изменения активности СОД в органах крыс, содержащихся в различных режимах освещения: LD – стандартное освещение, LL-1 – постоянное освещение с месячного возраста, LL-14 – постоянное освещение с 14 месяцев; \* – различия достоверны по сравнению с животными, содержащимися при LD, ◇ – различия достоверны по сравнению с животными, содержащимися при LL-1

В сердечной мышце крыс, содержащихся в условиях стандартного и постоянного освещения с месячного возраста, активность СОД снижалась уже к 12-месячному возрасту и сохранялась на одном уровне в течение дальнейшей жизни. У крыс, находившихся в группе LL-14, активность этого фермента, начиная с 18 месяцев,

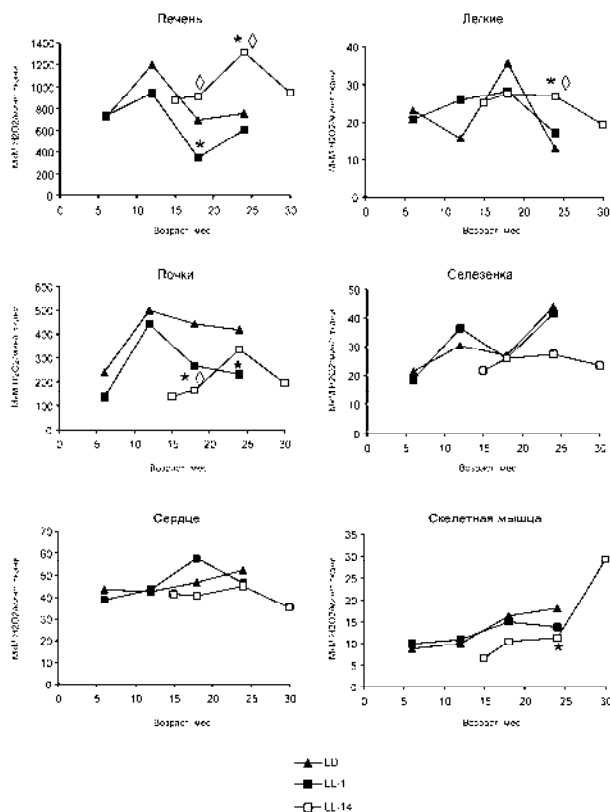


Рис. 2. Возрастные изменения активности каталазы в органах крыс, содержащихся в различных режимах освещения:  
Условные обозначения, как на рис. 1

резко увеличивалась, и среднее ее значение к 30 месяцам более чем в 7 раз превышало таковое у 15-месячных животных (рис. 1). Активность каталазы в сердце крыс группы LL-1 несколько увеличивалась к 18 месяцам, тогда как активность этого фермента у крыс группы LL-14 повышалась к 24 месяцам (рис. 2).

У крыс, находившихся с месячного возраста при постоянном освещении, снижение активности СОД в селезенке происходило уже к 12 месяцам, а в легких – к 18 месяцам. Изменение активности этого фермента в легких и селезенке у животных, с 14 месяцев находившихся при постоянном освещении, имело V-образный характер с минимумом в 24 месяца (рис. 1). Активность каталазы в легких у 30-месячных крыс, подвергавшихся воздействию постоянного освещения с 14 месяцев, находилась на уровне 24-месячных животных, с месячного возраста содержащихся при постоянном освещении. Отмечено, что сезонные изменения активности каталазы (повышение в весенний период и снижение осенью) в селезенке, характерные для крыс в группах LD и LL-1, исчезают при содержании крыс в условиях постоянного освещения с 14 месяцев (рис. 2).

Активность СОД в скелетной мышце крыс, содержащихся в стандартных световых условиях и при постоянном освещении с месячного возраста, постепенно увеличивалась до 18 месяцев, а затем резко снижалась к 24-месячному возрасту (рис. 1).

В скелетных мышцах крыс в группе LL-14 были отмечены сезонные колебания активности СОД с повышением в 18 и 30 месяцев. Активность каталазы в разных группах практически не различалась, но у крыс третьей группы отмечалось усиление активности в 30-месячном возрасте (рис. 2).

Полученные данные по активности ферментов хорошо согласуются с показателями продолжительности жизни экспериментальных животных. Установлено, что выживаемость как самцов, так и самок крыс, находившихся в группе LL-1, была значительно ниже (на графиках кривые их выживаемости смещены влево), чем у крыс в группах LD и LL-14 (рис. 3). Кроме того, указанные животные характеризовались более низкой средней (самки – на 22,1 %, самцы – на 3 %) и максимальной продолжительностью жизни (самки – на 18 %, самцы – на 4 %) по сравнению с крысами, находившимися при стандартном освещении (см. таблицу).

Кривые выживаемости самцов и самок в группе LL-14 сходны с таковыми у крыс в группе LD (рис. 3). СПЖ самок, с 14 месяцев находившихся при постоянном освещении, на 4 % ниже, а МПЖ на месяц больше, чем у самок крыс при стандартном освещении. У самцов в группе LL-14 показатели продолжительности жизни были выше по сравнению с животными, находившимися в стандартных световых условиях. Показатели продолжительности жизни как самцов, так и самок в группе LL-14 превышают таковые у крыс, содержащихся при постоянном освещении с месячного возраста (см. таблицу).

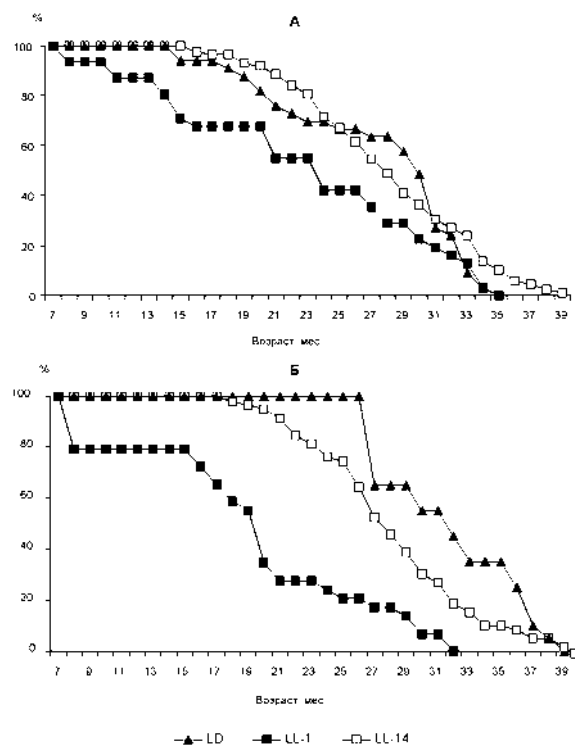


Рис. 3. Выживаемость самцов (А) и самок (Б) крыс, содержащихся в различных режимах освещения.  
Условные обозначения, как на рис. 1



## Влияние различных режимов освещения на продолжительность жизни самцов и самок крыс

Показатели		Световой режим		
		Стандартное освещение (LD)	Постоянное освещение (LL-1)	Постоянное освещение (LL-14)
Самцы	Количество крыс	57	50	88
	СПЖ, сут.	766 ± 25,3	744 ± 28,0	818 ± 18,0
	МПЖ, сут.	1045	1005	1198
	СПЖ последних 10 % крыс, сут.	994 ± 9,2	1002 ± 1,8	1087 ± 8,3*
Самки	Количество крыс	40	54	59
	СПЖ, сут.	844 ± 33,6	658 ± 22,8*	811 ± 20,0
	МПЖ, сут.	1167	956	1198
	СПЖ последних 10 % крыс, сут.	1129 ± 18,9	921 ± 19,7	1113 ± 24,9

Примечание. \* – различия достоверны по сравнению с животными в группе LD ( $p < 0,01$ ).

## ОБСУЖДЕНИЕ

Таким образом, снижение активности АОФ, свидетельствующее о «старении» системы в органах крыс, с 14 месяцев содержавшихся в условиях постоянного освещения, происходило позже (в 24 месяца), чем у животных, которые находились при стандартном и постоянном освещении с месячного возраста. Активность как СОД, так и каталазы в большинстве органов 24-месячных крыс группы LL-1 была ниже по сравнению с животными того же возраста группы LL-14. Изменение активности АОФ в период постнатального развития, которое наблюдалось у крыс, содержавшихся при постоянном освещении с 14 месячного возраста, согласуется с увеличением их продолжительности жизни. Полученные результаты позволяют утверждать, что воздействие постоянного освещения может приводить не только к сокращению продолжительности жизни крыс, как это было показано в работе И. А. Виноградовой и коллег [16], но и спо-

собствовать увеличению выживаемости животных. Фактором, обуславливающим эти различия, как и в ранее проведенных экспериментах на мышах [13], является срок начала экспериментальных воздействий. Так, при удалении эпифиза на разных этапах постнатального онтогенеза (3, 5, 7, 9, 14 и 18 месяцев) отмечалось либо сокращение, либо удлинение продолжительности жизни животных [13]. Эпифизэктомия в 14-месячном возрасте приводила к значительному увеличению выживаемости мышей и поддержанию их гормонального и метаболического статуса на уровне 5-месячных животных. Авторы считают, что именно в этом возрасте эпифиз запускает «программу» старения организма. Воздействие постоянного освещения с 14 месяцев у крыс и эпифизэктомия в этом возрасте у мышей [13] оказывают сходное влияние на продолжительность жизни животных. Нами установлено, что у самок крыс, находившихся в группе LL-14, СПЖ, МПЖ и СПЖ последних 10 % животных и МПЖ самцов этой группы достоверно выше, чем у крыс, содержавшихся при стандартном и постоянном освещении с возраста 1 месяца. СПЖ и МПЖ крыс, содержавшихся при постоянном освещении с месячного возраста, были значительно ниже по сравнению с животными других групп.

Проведенное исследование является еще одним подтверждением свободнорадикальной теории старения, выдвинутой Д. Харманом [10] и Н. М. Эмануэлем [6] более полувека назад. Воздействие подавляющего функциональную активность эпифиза постоянного освещения с 14-месячного возраста способно приводить к более позднему «старению» ферментативного компонента антиоксидантной системы крыс, что, возможно, является одной из причин продления жизни животных, а также подтверждением предположения Уолтера Пиерпаоли о ключевой роли эпифиза в запуске «программы» старения организма [13].

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (грант № 07-04-00546) и Гранта Президента РФ НШ-3731.2010.4.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Алтухов Ю. П. Гетерозиготность генома, интенсивность метаболизма и продолжительность жизни // Доклады АН. 1999. Т. 369. № 5. С. 704–707.
- Анисимов В. Н. Молекулярные и физиологические механизмы старения: В 2 т. 2-е изд., перераб. и доп. СПб.: Наука, 2008. Т. 1. 481 с.
- Виноградова И. А., Илюха В. А., Федорова А. С., Хижкин Е. А., Унжаков А. Р., Юнаш В. Д. Возрастные изменения физической работоспособности и некоторых биохимических показателей мышц крыс под влиянием световых режимов и препаратов эпифиза // Успехи геронтологии. 2007. Т. 20. № 1. С. 66–73.
- Ильина Т. Н., Виноградова И. А., Илюха В. А., Хижкин Е. А., Анисимов В. Н., Хавинсон В. Х. Влияние геропротекторов на возрастные изменения антиоксидантной системы печени крыс при различных световых режимах // Успехи геронтологии. 2008. Т. 21. № 3. С. 386–393.
- Коросов А. В., Горбач В. В. Компьютерная обработка биологических данных: Метод. пособие. Петрозаводск: Изд-во ПетрГУ, 2007. 76 с.
- Эмануэль Н. М. Некоторые молекулярные механизмы и перспективы профилактики старения // Изв. АН СССР. Сер. биол. 1975. № 4. С. 785–794.

7. Anisimov V. N. Light pollution, reproductive function and cancer risk // *Neuro Endocrinol. Lett.* 2006. Vol. 27. № 1–2. P. 35–52.
8. Bears R. F., Sizer I. N. A spectral method for measuring the breakdown of hydrogen peroxide by catalase // *J. Biol. Chem.* 1952. Vol. 195. № 1. P. 133–140.
9. Gutteridge J. M. C. Lipid peroxidation and antioxidants as biomarkers of tissue damage // *Clinical Chemistry.* 1995. Vol. 41. № 12. P. 1819–1828.
10. Harman D. Aging: a theory based on free radical and radiation chemistry // *J. Gerontol.* 1956. Vol. 11. № 2. P. 298–300.
11. Misra H. H., Fridovich I. The role of superoxide anion in the autoxidation of epinephrine and a simple assay for superoxide dismutase // *J. Biol. Chem.* 1972. Vol. 247. P. 3170–3175.
12. Pierpaoli W., Bulian D. The pineal aging and death program. I. Grafting of old pineals in young mice accelerates their aging // *J. Anti-Aging. Med.* 2001. Vol. 4. № 1. P. 31–37.
13. Pierpaoli W., Bulian D. The pineal aging and death program. II. Life prolongation in pre-aging pinealectomized mice // *Ann. N. Y. Acad. Sci.* 2005. Vol. 1057. P. 133–144.
14. Sohal R. S., Orr W. C. Relationship between antioxidants, prooxidants, and the aging process // *Ann. N.Y. Acad. Sci.* 1992. Vol. 663. № 1. P. 74–84.
15. Stevens R. G. Circadian disruption and breast cancer: from melatonin to clock genes // *Epidemiology.* 2005. Vol. 16. № 5. P. 254–258.
16. Vinogradova I. A., Anisimov V. N., Bukalev A. V., Semchenko A. V., Zabezhinski M. A. Circadian disruption induced by light-at-night accelerates aging and promotes tumorigenesis in rat // *Aging.* 2009. Vol. 1. № 10. P. 855–865.

УДК 612.82

**АНДРЕЙ ЛЬВОВИЧ ЖЕСТЯНИКОВ**

кандидат медицинских наук, ассистент кафедры семейной медицины (общей врачебной практики) медицинского факультета, Петрозаводский государственный университет  
*zhestyanikov@onego.ru*

**НАТАЛЬЯ ВЛАДИМИРОВНА ДОРШАКОВА**

доктор медицинских наук, профессор, заведующий кафедрой семейной медицины (общей врачебной практики) медицинского факультета, проректор по научно-исследовательской работе, Петрозаводский государственный университет  
*dorshakova@psu.karelia.ru*

**ТАТЬЯНА АЛЕКСЕЕВНА КАРАПЕТЯН**

доктор медицинских наук, доцент кафедры семейной медицины (общей врачебной практики) медицинского факультета, Петрозаводский государственный университет  
*kara@karelia.ru*

**МАКРО- И МИКРОЭЛЕМЕНТЫ В НЕЙРОХИМИЧЕСКИХ,  
НЕЙРОФИЗИОЛОГИЧЕСКИХ МЕХАНИЗМАХ  
И ОБЕСПЕЧЕНИИ НОРМАЛЬНОГО КРОВΟΣНАБЖЕНИЯ ВЕЩЕСТВА ГОЛОВНОГО МОЗГА**

В статье представлены данные исследований, свидетельствующие о значительной роли макро- и микроэлементов в поддержании нормального кровоснабжения головного мозга, а также их дисбалансе в патогенезе цереброваскулярных заболеваний. Приведены сведения об участии ряда химических элементов и металлоферментов в механизмах нейропротекции, антиоксидантной защиты, регуляции функционального состояния эндотелия.

Ключевые слова: макроэлементы, микроэлементы, кровоснабжение вещества головного мозга

Цереброваскулярные заболевания (ЦВЗ) – глобальная медицинская и социальная проблема. При этом показатели смертности от этой патологии в России одни из самых высоких в мире. Ежегодно в нашей стране происходит около 400 тыс. инсультов, причем лишь 8–10 % из них заканчиваются восстановлением нарушенных функций уже в первые 3 недели заболевания, а в остальных случаях расстройства движения, речи, когнитивных функций более выраженные и стойкие [53], [81]. По разным данным, общая летальность при инсульте составляет от 25 до 54 %, а постинсультная инвалидизация – от 70 до 82 % [3]. При развитии ишемического инсульта грубое расстройство кровотока часто носит кратковременный характер, в то время как формирование патологического дефекта мозгового вещества растягивается на продолжительный период и величина повреждений при сходных клинических ситуациях значительно варьирует [84]. Патологические процессы, объясняющие формирование диффузных морфологических

изменений мозгового вещества при инсультах, остаются недостаточно ясными и изученными. Это обуславливает перспективность развития стратегии превентивной нейропротекции, направленной на защиту вещества мозга от ишемии в условиях высокого риска цереброваскулярной катастрофы. В этой связи следует отметить важную роль антиоксидантной нейропротекции при ЦВЗ [59], [68].

Микроэлементам (МЭ) и содержащим МЭ ферментным системам принадлежит важная роль в механизмах нейро- и ангиопротекции, антиоксидантной защиты (АОЗ) [1], [25], [60], [100]. Показана существенная роль дисбаланса между прооксидантными и антиоксидантными системами (включая медь-цинк-зависимую супероксиддисмутазу (Cu-Zn-SOD)) в патогенезе атеросклеротического поражения каротидных артерий [93]. Вместе с тем у большей части населения России выявлены нарушения структуры питания, в значительной степени обусловленные недостаточным поступлением с пищей витами-

нов, макро- и микроэлементов, полноценных белков, а также их дисбалансом в рационе, что является фактором риска развития алиментарно-зависимой патологии [24], [66]. Данные исследований, проведенных в последние годы, показывают, что пищевые антиоксиданты (включая МЭ) могут быть эффективны в противодействии дегенеративным и хроническим заболеваниям нервной системы [13]. Экзогенные металлодержатели биоантиоксиданты (модифицированные формы СОД и каталазы) рассматриваются в ряде исследований как эффективные средства защиты сосудов от действия оксидативного стресса, проявляющие также (при связывании с гликозаминогликаном сосудистой стенки) анти-тромботические свойства [78]. Отмечается участие магния (Mg), марганца (Mn), цинка (Zn), меди (Cu) в регуляции механизмов агрегации тромбоцитов [79]. В современной медицинской элементологии особое внимание уделяется изучению взаимодействия различных элементов, подчеркиваются важность исследования поли-элементного спектра и дисбаланса как макро-элементов (МаЭ), так и МЭ в патогенезе заболеваний системы кровообращения [31], [32], [35], [40]. Следует подчеркнуть роль МЭ в обеспечении жизнеопределяющих нейрофизиологических процессов: участие в формировании каталитических центров и стабилизации регуляторных сайтов в составе более чем 1000 различных ферментов нервной и глиальной тканей; вовлеченность в синтез многочисленных нейромедиаторов и механизмы антиоксидантной защиты; поддержание пластических процессов в нервной системе; доказаны участие ряда МЭ в гистогенезе нервной ткани, процессах апоптоза, патогенезе нейродегенеративных заболеваний [17], [44], [119].

Исследование микроэлементного спектра и его изменений в плазме крови больных с ишемическим полушарным инсультом выявило низкое содержание селена (Se), кобальта (Co), Zn и Mg в группе больных с плохим восстановлением неврологического дефицита [84]. Получены данные о разнонаправленных изменениях концентрации эссенциальных и токсичных (ЭМЭ и ТМЭ) в группах больных с различными исходами геморрагического инсульта (ГИ): у больных с удовлетворительным восстановлением и минимальным неврологическим дефектом было отмечено повышение содержания многих ЭМЭ (Zn, Se, Co, хрома (Cr)) и условно-эссенциальных (олова (Sn), мышьяка (As)) в сочетании со снижением большинства ТМЭ (алюминия (Al), кадмия (Cd), таллия (Tl), ртути (Hg)) и потенциально-токсичных (серебра (Ag)) [37]. Кроме того, при исследовании микроэлементного спектра плазмы крови у 65 больных с геморрагическим инсультом отмечены следующие прогностически благоприятные признаки: нарастание содержания Zn, Cr, Se в сочетании со снижением Co, Cd, Tl и Hg; среди прогностически неблагоприятных – снижение содержания йода (I), Cr и Mg в сочетании с повышением Tl, Cu и Cd

[48]. В данной работе у всех больных выявлены прямые корреляционные связи между возрастом и повышением уровня Se в сочетании со сниженным содержанием лития (Li) и висмута (Bi). Получены данные о дисбалансе МЭ при сосудистом паркинсонизме: отмечается повышение содержания в плазме крови Se, Mn и Cd, а также снижение Cr [88]. В некоторых работах обращается внимание на существенное значение дисбаланса Mg в патогенезе синдрома паркинсонизма [27]. Экспериментальные данные показали ряд морфо-функциональных изменений при использовании имитатов питьевой воды с повышенным содержанием некоторых химических элементов: при высоких концентрациях Ca наблюдался спазм сосудов с последующей ишемизацией ткани головного мозга (ГМ); при повышенных концентрациях Mg – умеренный отек тканей ГМ и полнокровие капилляров; избыточное содержание железа (Fe) приводило к деструктивным изменениям стенки сосудов, сужению их просвета, ишемии мозговой ткани, а также сопровождалось явлениями вакуолизации, кариопикноза, цитолиза; сочетанное влияние повышенных концентраций Ca, Mg и Fe проявлялось нарушениями кровообращения, выраженным полнокровием и кровоизлияниями у экспериментальных животных [61].

В последнее время обращается внимание на серьезную роль климатогеографических, антропогенных и биогеохимических факторов в патогенезе заболеваний нервной системы, патологии сердца и сосудов, подчеркивается весомый вклад нарушений элементного статуса организма в формирование указанных изменений [14], [29], [33], [50], [69], [85], [86]. Важно отметить, что накопление активных форм кислорода (в противодействии которым велика роль металлозависимых ферментов) вследствие перестройки тканевых метаболических путей у жителей обширных северных регионов нашей страны – важный элемент формирования «полярного адаптивного метаболического типа» [58], [10]. При оценке влияния комплекса антропогенных факторов промышленного города (Оренбургская область) на возникновение острых нарушений мозгового кровообращения (ОНМК) выявлены особенности биоаккумуляции элементов в организме: в крови больных с ОНМК содержание свинца (Pb), стронция (Sr), Mn и Cu превысили их значения у лиц контрольной группы [8]. Ряд исследователей отмечают, что именно неблагоприятной средой обитания объясняется более высокая частота и выраженность мышечно-эластической гиперплазии интимы и других изменений артерий у молодых людей в некоторых регионах [33]. Обращается внимание на существенную сопряженность показателей обмена МЭ и функционального состояния сосудистого эндотелия (в частности, содержание стабильных метаболитов оксида азота) и подчеркивается значение этих взаимосвязей в сложных для адаптации климатогеографических условиях

[69]. Вместе с тем эндотелиальной дисфункции принадлежит значительная роль в патогенезе ЦВЗ [82]. В исследованиях доказано, что ряд тяжелых металлов (Pb, Cd, Hg и некоторые другие) способны вызывать повреждение и гибель эндотелиальных клеток [34]. Эти изменения оказывают существенное влияние на состояние сосудов и трофики головного мозга.

Все большее внимание исследователей привлекают МЭ с малоизученной ролью в организме. Примечательно относительно высокое (по сравнению с другими органами) содержание золота (Au), Sn, Tl и Hg в ГМ [44]. Фармакологические эффекты ряда нейротропных препаратов в значительной степени связаны с их влиянием на обмен МЭ. Нейрометаболические препараты природного происхождения (церебролизин, биллобил, актовегин), имеющие в своем составе МаЭ и МЭ, обладают достаточно выраженными антиоксидантными свойствами, связанными в том числе с активностью СОД [21]. Показана эффективность препарата «Кортексин», имеющего в своем составе комплекс эссенциальных МаЭ и МЭ, в терапии ишемических поражений ГМ [61]. Обращается внимание на то, что эффективность «Актовегина» при ишемическом инсульте (ИИ) также в значительной степени связана с наличием в нем эссенциальных биоэлементов [21], [63]. Сообщается об эффективности при ИИ хелатного комплекса DP-b99 (имеющего в своем составе ионы Zn и Ca), который проявляет нейропротективные свойства и действует избирательно в пределах клеточных мембран [96]. В последние годы обращается внимание на взаимосвязь обмена ряда МЭ и такого многофункционального медиатора, как оксид азота (NO). Его роль в организме многогранна, велико его значение и в регуляции гемодинамики: NO выступает как фактор снижения тонуса гладкой мускулатуры сосудов и регулятор системного артериального давления. Кроме того, отмечена его нейротрансмиссерная функция [20]. При этом получены данные о тесной взаимосвязи метаболизма NO с обменом Fe, Cu, Zn, Co, Se и содержащих данные атомов ферментов [45].

Mg – естественный антагонист ионов Са [26]. Данный биоэлемент предотвращает избыточное поступление ионов Са в клетки, способствует их активному выведению из клеток посредством Са-АТФазы, активатором которой являются ионы Mg [19]. В то же время нарушение баланса в обмене ионов Са значительно влияет на глубину и распространенность зоны ишемии, высокая неконтролируемая концентрация внутриклеточного Са приводит к избыточному высвобождению нейротрансмиттеров и к нежелательной, поглощающей энергию гиперактивности нейронов в подвергшейся ишемии зоне [28], [38]. Недостаточность Mg, в значительной степени связанная с недостаточным его поступлением в организм с пищей и питьевой водой, яв-

ляется одним из наиболее распространенных вариантов патологии элементного статуса у населения России (наряду с дефицитом I, Ca, Zn, Se) [46], [22], [26]. Дефицит Mg в диете приводит к снижению скорости кровотока большинства органов, повышению периферического сопротивления периферических сосудов, снижению микроциркуляции в капиллярах [6]. Mg важен для нормального функционирования центральной нервной системы (ЦНС), так как входит в состав рецепторных образований (например, NMDA-рецепторов – ионотропных рецепторов глутамата, селективно связывающих N-метил-D-аспартат), участвует в синтезе и медиации нейротрансмиттеров [47]. Он необходим для синтеза всех нейропептидов в ГМ (адреналина и норадреналина, эндорфинов, релизинг-гормонов гипоталамуса и ряда других). Кроме того, Mg является одним из важнейших регуляторов регионарной и системной гемодинамики, артериального давления (данный МаЭ выступает в качестве антагониста эндотелина-1 [75], способствует подавлению повышенной активности ренин-ангиотензин-альдостероновой системы) [83]. При дефиците Mg повышается чувствительность сосудов к вазоконстрикторному воздействию катехоламинов, повышается риск развития тромбозов [88]. При снижении уровня Mg в организме возрастает тонус мозговых сосудов, что приводит к ишемическому повреждению [66]. Отмечено повышение частоты ИИ в биогеохимических провинциях со сниженным содержанием Mg и Са в питьевой воде [80]. У подростков с длительным дефицитом Mg возрастает риск формирования ранних форм цереброваскулярной патологии с преимущественным формированием гиперконстрикторных реакций [23]. Уменьшение внутриклеточного содержания Mg и увеличение Са является фактором риска инсулинрезистентности тканей и предрасполагает к формированию атеросклероза [22], [26]. Mg – физиологический регулятор продукции альдостерона, магниевая коррекция имеет существенное значение при гиперальдостеронизме [23], [94]. Препараты, содержащие биоорганические соединения Mg (в частности, «МагнеВ6»), являются эффективными и перспективными средствами в комплексной терапии кардио- и цереброваскулярных расстройств [42], [64], [87]. Магния и калия (K) аспарагинаты также признаются важными составляющими комплексной терапии заболеваний системы кровообращения [40].

Следует отметить, что синтез и метаболизм одного из регуляторов гемодинамики, NO, в значительной степени являются Са-зависимыми; Са-зависимы и механизмы апоптоза, в том числе в нервной ткани [45]. Са отведена важная роль в процессах агрегации тромбоцитов и в целом гемокоагуляции, что нельзя не отметить при рассмотрении особенностей патогенеза ЦВЗ [79]. Ионам Са, а также их взаимодействию с ионами Mg, K и натрия (Na) принадлежит центральная

роль в механизмах сокращения и релаксации гладкомышечных клеток сосудов (в том числе церебральных), что во многом определяет параметры системной и регионарной гемодинамики. При нарушении перфузии происходит истощение запасов аденозинтрифосфорной кислоты, что приводит к нарушению функции калий-натриевых (K-Na) каналов мембран нейронов и глиальных клеток и развитию цитотоксического отека [63]. Механизм действия ряда медикаментов, используемых при заболеваниях системы кровообращения, напрямую связан с влиянием на ионные кальциевые потоки. Основным механизмом действия блокаторов медленных кальциевых каналов основан на уменьшении поступления ионов Са в гладкомышечные клетки сосудов, что приводит к артериальной вазодилатации, снижению периферического сопротивления и артериального давления [16]. Неконтролируемый ток ионов Са играет важную роль в нарушении функции эндотелия и формировании аномального ответа сосудов на физиологические стимулы [53]. Амлодипин проявлял в проведенном исследовании достоверный антигипертензивный эффект, повышал содержание NO в сыворотке крови обследуемых пациентов и нормализовал церебральный кровоток при тяжелой степени артериальной гипертензии [53]. Есть основания полагать, что амлодипин способен улучшать эндотелийзависимую вазодилатацию за счет увеличения содержания NO вследствие того, что он меньше разрушается, а также в связи с ростом активности СОД [53]. Действие другого класса препаратов – ингибиторов ангиотензинпревращающего фермента (ИАПФ) в значительной степени связано с коррекцией натрий-кальциевых (Na-Ca) нарушений: ИАПФ, обладающие высокой тканевой активностью (периндоприл и аналогичные препараты), способны эффективно блокировать механизмы Na-Ca-нарушений посредством уменьшения концентрации ангиотензина II [2].

Mn является важным компонентом ряда антиоксидантных систем (АС) организма, в частности фермента марганецзависимой СОД (Mn-СОД), которая локализуется непосредственно внутри митохондрий и защищает клеточные структуры от продуктов оксидативного стресса [98]. Вместе с тем состояние биоэнергетики митохондрий имеет важное значение в резистентности нервной ткани при ишемическом повреждении [60], [6]. Ряд исследователей подчеркивают, что именно изучение особенностей «работы» митохондриальных АС (включая Mn-СОД) и эндотелиальной дисфункции, а также их взаимосвязи является ключом к обновленному пониманию механизмов формирования патологии ГМ, в том числе сосудистой [110], [118]. Авторы обращают внимание, в частности, на защитную роль митохондриальных АС, локализующихся в эндотелиальных клетках ГМ, и их функциональную взаимосвязь с эстрогеновыми альфа-рецепторами [110]. Mn-

содержащие энзимы (галактозил- и ксилозил-трансферазы) имеют важное значение в регуляции конечного этапа гемокоагуляции [79]. Продемонстрированы нейропротективные и ангиопротективные эффекты Mn при ишемии ГМ в эксперименте [109].

Fe является элементом, необходимым для базовых процессов нейрогенеза, так как входит в состав ферментов, участвует в миелинизации нервных волокон, продукции нейромедиаторов и энергетическом метаболизме [56]. В то же время важно подчеркнуть актуальность проблемы латентного дефицита железа, длительно протекающего без отчетливой клинико-лабораторной симптоматики. Это имеет особое значение для регионов со сложными климатогеографическими и геохимическими условиями [43], [48], [51], [57]. При дефиците железа происходит снижение окислительных процессов в гиппокампе и фронтальных отделах коры, снижение концентрации дофамина, изменение жирнокислотного состава и структуры миелина в нервных волокнах [112]. Кроме того, при дефиците железа снижается активность ферментов альдегидоксидазы и аминоксидазы, в результате чего нарушается катаболизм катехоламинов, возрастает их концентрация в биосредах организма, усиливаются симпатикотонические влияния [9]. В исследовании, проведенном J. Marniemi, E. Alanen, O. Impivaara и др., получены данные, говорящие о более высоком риске развития ИИ у лиц пожилого возраста при низком уровне Fe в сыворотке крови [95]. Динитрозильные комплексы Fe способны защищать входящий в их состав NO от окисления и высвобождать его при контакте с гладкомышечными клетками [11], [20].

Избыточное накопление Fe в интерстициальной жидкости, ликворе и глии приводит к значительному повышению проницаемости гематоэнцефалического барьера (ГЭБ) [120]. Транссудация крови в поврежденную мозговую ткань при геморрагическом инсульте приводит к накоплению каталитически активного Fe, что активизирует перекисное окисление липидов (ПОЛ) [17], [119].

Со участвует в механизмах гемопоэза, регуляции обмена катехоламинов, биосинтезе миелина, окислительно-восстановительных реакциях [70], [75]. Его недостаток актуален для многих регионов России, включая районы Севера [57]. При дефиците Со развиваются дисфункция вегетативной нервной системы и дисрегуляторные расстройства кровообращения [66]. Физиологические дозы Со обладают коронаролитическим, гипотензивным действием [39].

Cu – эссенциальный МЭ, являющийся кофактором более 30 различных ферментов [75], [90]. Следует отметить, что на территории России есть территории как с повышенным, так и пониженным содержанием Cu в природных средах. Вместе с тем дефицит Cu – актуальная проблема для жителей многих регионов России [72], [73]. Ряд медьзависимых белков имеют важней-

шее значение для нормальной деятельности нервной системы и системы кровообращения: Cu-Zn-СОД защищает клеточные мембраны от повреждения активными метаболитами кислорода, лизилоксилаза необходима для синтеза коллагена и эластина (без чего невозможна нормальная структурная организация сосудистой стенки), дофамин-*b*-гидроксилаза участвует в биосинтезе катехоламинов, цитохром С играет ключевую роль в цепи тканевого дыхания, хефастатин регулирует всасывание Fe, ангиогенин играет важную роль в капиллярогенезе [66], [70]. При дефиците Cu и связанном с ним снижении активности лизилоксидазы нарушается нормальное формирование коллагена и эластина, что приводит к патологическим изменениям соединительнотканых структур сосудов [4], [5], [74], [107]. Содержащий Cu фермент церулоплазмин также играет важную роль в механизмах АОЗ [36]. Синтетический активатор Cu-Zn-СОД (PER-1-CCS) в эксперименте проявлял нейропротективное действие при ишемии мозга [116]. Cu наряду с Zn и Se препятствует инактивации эндотелиального релаксирующего фактора продуктами перекисного окисления липидов, косвенно выступая в качестве вазодилататора [52]. Получены экспериментальные данные о торможении аортального атерогенеза при дополнительном введении Cu или Zn в пищевой рацион [114]. В исследовании В. М. Боева, В. В. Быстрых, Н. Н. Верещагина и соавторов получены данные о повышении содержания Cu в крови при всех видах инсульта, а также отмечена положительная корреляция между содержанием этого элемента в питьевой воде и распространенностью ОНМК [8].

Сообщается о более высоких концентрациях Zn и сниженных концентрациях Cu в сыворотке крови пожилых больных с цереброваскулярной патологией, а также об увеличенной выработке интерлейкина 1 у пациентов данной группы [97]. Важно подчеркнуть существенную роль Zn в нейросекреторных механизмах: отмечается высокая концентрация данного элемента в синаптических пузырьках особого вида нервных клеток, так называемых цинксодержащих нейронах; Zn участвует в регуляции уровня глутамата, увеличивая его количество путем полимеризации и преципитации или замедляя его высвобождение; в мозге существует целый ряд белков, включающих рецепторы, транспортные белки (такие, например, как б-макроглобулин), для нормального функционирования которых необходим Zn [56]. Zn, NO и нейроспецифический металлотионеин III имеют сходное распределение в гиппокампе и других участках ЦНС, что может свидетельствовать о существенной взаимосвязи между гомеостазом металла и процессами продукции NO [25]. Следует отметить участие Zn в механизмах гемокоагуляции: связывание тромбоцитов с высокомолекулярным кининогеном (фактором Фишера-Вильямса-Фложака) происходит при уча-

стии ионов Zn [79]. Получены данные об эффективности применения органических форм ЭМЭ в виде их комплексов с ферментативными гидролизатами пищевых белков при дефиците Zn и некоторых других атомовитов (Cu, Mn, Cr) [41].

Следует отметить, что влияние Zn на обменные процессы в ЦНС неоднозначно. Ряд исследователей акцентируют внимание на том, что внеклеточный, «свободный», Zn, находящийся в пресинаптических окончаниях определенных специализированных корковых нейронов является мощным модулятором глутаматэргической передачи и одним из ключевых факторов в нейрональном ишемическом повреждении [92], [99]. Кроме того, в экспериментальной модели при ишемии и реперфузии мозга наблюдалось высвобождение в переменной концентрации ионов Zn (без глутамата), имеющих, как предполагают исследователи, несинаптический источник. Данный вопрос требует дальнейшего изучения [92].

Se обоснованно можно назвать важным мио- и нейротрофическим фактором. Получены положительные результаты лечения пациентов, страдающих нервно-мышечной патологией, с применением Se, а также витаминов E и B6, L-карнитина и кофермента Q10 [13]. Se способствует нормализации липидного обмена и предупреждению развития атеросклероза [7]. Ангиопротективное действие Se в значительной степени связано с антиоксидантной ролью данного МЭ, селеносодержащие белки являются важной составной частью системы АОЗ [65], [111]. Показана важная роль селенопротеина Р в поддержании нормальной функции эндотелия сосудов, повреждаемого одним из продуктов оксидативного стресса – пероксинитритом [106], [117]. Выявлен дозозависимый эффект содержащих Se БАД на активность ПОЛ [77]. Вместе с тем большинство районов Северо-Запада России относится к селенодефицитным провинциям [12], [39], [55].

Получены данные о повышении содержания Li при полушарном ИИ к 30-му дню заболевания в группе выживших больных (0,62–0,67 ммоль/л), тогда как при полушарном ГИ концентрация Li нарастала к 3–6-м суткам заболевания (0,58–0,60 ммоль/л), впоследствии снижаясь к 30-м суткам (0,46–0,48 ммоль/л) в группе больных с хорошим восстановлением [54]. Авторы акцентируют внимание на нейропротективном действии Li при ишемических поражениях мозга и его роли в защите мозга от развития нейродегенеративных процессов.

В некоторых публикациях обращается внимание на изменения содержания МЭ с недостаточно изученной метаболической функцией. Сообщается о низких концентрациях Au в плазме крови при летальном исходе полушарного ИИ [84].

Важную роль в обменных процессах, происходящих в нервной ткани, играет взаимодействие МЭ со структурами ГЭБ. Pb, Cd и Hg способны вызывать апоптоз эндотелиальных и периваскулярных клеток, что повреждает систему детокси-

кации металлов и ведет к нарушению передачи информации о потребностях в ЭМЭ в мозге к клеткам ГЭБ [44]. Кроме того, Pb и Cd проявляют антагонистические свойства по отношению к ЭМЭ – Zn, Se, Fe [30], [71], [66], [113]. Pb и его соединения оказывают существенное негативное влияние на гемодинамику в целом и на кровоснабжение ГМ: воздействуя на центральные и периферические синапсы, они повышают тонус симпатической нервной системы, увеличивают чувствительность синапсов к катехоламинам, повышают содержание катехоламинов в крови, увеличивают синтез и выделение ренина, стимулируют и пролонгируют сокращения гладкомышечных волокон сосудов, оказывают цитотоксическое воздействие на эндотелиальные клетки [34], [39], [105], [108]. Токсическое действие Pb на структуры ЦНС и кровоснабжение ГМ в значительной степени обусловлено его антагонистическим взаимодействием с эссенциальными элементами – Ca, Mg и Na [71].

По некоторым данным, при более высоком содержании Cd в природных средах возрастает его экскреция с мочой, а у лиц, проживающих в таких районах, отмечаются более низкие скорость артериальной пульсовой волны и артериальное пульсовое давление [91]. Cd оказывает негативное влияние на системную и церебральную гемодинамику за счет повреждения гипоталамо-гипофизарного звена регуляции, угнетения клеточного дыхания, нарушения функции эндотелия и мускариновых холинорецепторов [66], [104].

Hg является одним из наиболее актуальных антропогенных токсикантов. Соединения

ртути обладают значительной тропностью к богатым липидами и обильно кровоснабжаемым тканям, оказывают выраженное негативное воздействие на функциональное состояние и структуры нервной ткани и сосудов [15], [18]. Отмечена зависимость степени выраженности изменений биоэлектрической активности ГМ от концентрации ртути в крови и моче [15].

В исследованиях последних лет показано, что As также является достаточно распространенным в окружающей среде многих регионов мира токсикантом, индуцирующим оксидативный стресс, вызывающим, помимо прочих, многообразные сосудистые и неврологические расстройства [101], [102], [103], [115].

Таким образом, анализ литературных данных свидетельствует о многообразной роли МаЭ и МЭ в патогенезе тех функциональных и морфологических изменений, которые происходят в веществе ГМ. При этом следует отметить, что многие химические элементы могут оказывать как благоприятное, так и негативное воздействие на функциональное состояние и структуры нервной системы и сосудов. Это в значительной степени зависит от концентрации МЭ в биосредах организма, их взаимодействия между собой, особенностей адаптационных механизмов. Кроме того, элементный дисбаланс может оказывать существенное влияние на фармакокинетику и фармакодинамику нейротропных и вазоактивных препаратов. Роль некоторых химических элементов в обменных процессах, происходящих в нервной ткани, исследована недостаточно. Данные вопросы еще требуют дальнейшего изучения.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Авцын А. П., Жаворонков А. А., Риш М. А., Строчкова Л. С. Микроэлементозы человека: этиология, классификация, органопатология. М.: Медицина, 1991. 496 с.
2. Александров А. А. Результаты ADVANCE 2007 г.: «неправильные» ответы на незадаанные вопросы // CONSILIUM MEDICUM. 2007. Т. 9. № 11. С. 76–80.
3. Антонов А. Р., Якобсон Г. С., Васькина Е. А. и др. Нарушения обмена микроэлементов при артериальной гипертензии и инфаркте миокарда // Российский кардиологический журнал. 2002. Т. 35. № 3. С. 67–71.
4. Бабенко Г. А. Микроэлементозы человека: патогенез, профилактика, лечение // Микроэлементы в медицине. 2000. Т. 2. Вып. 1. С. 2–5.
5. Барашков Г. К. Микроэлементы в теории и практике медицины // Врач. 2004. № 10. С. 45–48.
6. Боев В. М., Быстрых В. В., Верещагин Н. Н. и др. Биоэлементы и донозологическая диагностика // Микроэлементы в медицине. 2004. Т. 5. Вып. 4. С. 17–20.
7. Бойко Е. Р., Потолицина Н. Н., Бойко С. Г. и др. Обеспеченность населения Севера жирорастворимыми витаминами // Вопросы питания. 2008. Т. 77. № 3. С. 64–67.
8. Бугланов А. А., Саяпина Е. В., Тураев А. Т. Биохимическая и клиническая роль железа // Гематология и трансфузиология. 1991. Т. 36. № 9. С. 36–37.
9. Буюк М. А., Буганов А. А. Развитие окислительного стресса у жителей высоких широт при воздействии факторов Крайнего Севера // Гигиена и санитария. 2009. № 1. С. 15–17.
10. Ваваев А. В., Тищенко Е. Г., Бурячковская Л. И. и др. Сосудистая стенка: оксидативное поражение и внеклеточная защита антиоксидантными ферментами // Кардиологический вестник. 2007. Т. II (XIV). № 1. С. 41–45.
11. Ванин А. Ф. Динитрозильные комплексы железа и S нитрозотиолы – две возможные формы стабилизации и транспорта оксида азота в биосистемах // Биохимия. 1998. Вып. 7. С. 924–938.
12. Вапиров В. В., Чаженина Е. А., Вапирова Н. В. Селеновый статус Республики Карелия // Эко-аналитический контроль природных объектов Карелии: Сб. статей. Петрозаводск: Изд-во ПетрГУ, 2002. С. 79–84.
13. Вапиров В. В., Шубина М. Э., Вапирова Н. В. и др. Некоторые механизмы участия селена в развитии патологии // Эко-аналитический контроль природных объектов Карелии: Сб. статей. Петрозаводск: Изд-во ПетрГУ, 2002. С. 47–56.
14. Вестмарк Т., Атроши Ф. Диетологические подходы к лечению пациентов с мышечной дистрофией Дюшенна (МДД), пациентов с болезнью Шпильмайера-Сьегрена (ЮНЦЛ) и пациентов, страдающих эпилепсией // Микроэлементы в медицине. 2005. Т. 6. Вып. 2. С. 27–32.



15. Винокур Т. Ю. К вопросу об особенностях течения ишемической болезни сердца в связи с эколого-биогеохимическим районированием Чувашии // Микроэлементы в медицине. 2001. Т. 2. Вып. 3. С. 10–14.
16. Галявич А. С. Применение антагонистов кальция в кардиологии // CONSILIUM MEDICUM. 2007. Т. 9. № 11. С. 49–52.
17. Геморрагический инсульт: Практическое руководство / Под ред. В. И. Скворцовой, В. В. Крылова. М.: ГЭОТАР-Медиа, 2005. 160 с.
18. Гичев Ю. Ю., Гичев Ю. П. Руководство по биологически активным добавкам. М.: Триада-Х, 2001. 232 с.
19. Голиков П. П. Оксид азота в клинике неотложных заболеваний. М.: ИД Медпрактика-М, 2004. 180 с.
20. Гонсалес Д. Э. Н. Питание как фактор риска развития гипертонической болезни и ишемической болезни сердца // Вопросы питания. 2007. Т. 77. № 3. С. 15–20.
21. Громова О. А. Физиологическая роль и значение магния в терапии // Терапевтический архив. 2004. Т. 76. № 10. С. 58–62.
22. Громова О. А. Магнезиальная терапия в поликлинической практике // Справочник поликлинического врача. 2006. № 1. С. 19–24.
23. Громова О. А., Кудрин А. В. Нейрохимия макро- и микроэлементов. Новые подходы к фармакотерапии. М.: АЛЕВ-В, 2001. 274 с.
24. Громова О. А., Никонов А. А. Значение магния в патогенезе заболеваний нервной системы // Журнал неврологии и психиатрии им. С. С. Корсакова. 2002. № 12. С. 62–67.
25. Громова О. А., Скальный А. В., Панасенко О. М. Структурный анализ и ферментативная антиокислительная активность нейрометаболических препаратов природного происхождения: церебролизина, церебролизата, биллобила и актовегина // Микроэлементы в медицине. 2000. Т. 2. Вып. 1. С. 23–27.
26. Гудкова В. В., Стаховская Л. В., Кирильченко Т. Д. и др. Применение Актовегина на разных этапах лечения больных с ишемическим инсультом // CONSILIUM MEDICUM. 2007. Т. 9. № 8. С. 22–25.
27. Гузева В. И., Чухловина М. Л., Чухловин Б. А. Факторы окружающей среды и синдром паркинсонизма // Гигиена и санитария. 2008. № 2. С. 60–62.
28. Гусев Е. И., Скворцова В. И. Ишемия головного мозга. М.: Медицина, 2001. 328 с.
29. Гусев Е. И., Скворцова В. И., Изыкенова Г. Л. и др. Изучение уровня аутоантител к глутаматным рецепторам в сыворотке крови у больных в остром периоде ишемического инсульта // Журнал неврологии и психиатрии им. С. С. Корсакова. 1996. Т. 96. № 5. С. 68–72.
30. Долгушин В. И., Сусликов В. Л. К вопросу об участии микроэлементов в развитии облитерирующего эндоартериита // Микроэлементы в медицине. 2004. Т. 5. Вып. 1. С. 25–27.
31. Доршакова Н. В., Герасимова Л. И., Тараканова Л. И. Человек и окружающая среда: Курс лекций. Петрозаводск: Изд-во ПетрГУ, 2003. 274 с.
32. Ежов А. В., Чураков А. Н., Шипицин А. Н. и др. Применение магния при сердечно-сосудистых заболеваниях (хроническом коронарном синдроме, артериальной гипертензии и сердечной недостаточности) // Российский кардиологический журнал. 2003. Т. 40. № 2. С. 87–92.
33. Жестяников А. Л., Доршакова Н. В., Карапетян Т. А. Некоторые особенности микроэлементного статуса у проживающих в Карелии больных нейроциркуляторной дистонией // Вестник Российского университета дружбы народов. Сер. «Медицина». 2004. Т. 27. № 3. С. 38–43.
34. Жестяников А. Л., Доршакова Н. В., Карапетян Т. А. Роль дисбаланса микроэлементов в патогенезе вегетативных и кардиоваскулярных расстройств у жителей Карелии // Бюллетень сибирской медицины. 2005. Т. 4. Прил. 1. С. 5.
35. Жестяников А. Л., Доршакова Н. В., Карапетян Т. А. Нейроциркуляторная дистония: роль дисбаланса микроэлементов в патогенезе // Ученые записки Петрозаводского государственного университета. Сер. «Естественные и технические науки». 2008. № 4(96). С. 56–61.
36. Зербино Д. Д., Соломенчук Т. Н. «Атеросклероз» – конкретная патология артерий или «унифицированное» групповое определение? Поиск причин атеросклероза: экологическая концепция // Архив патологии. 2006. Т. 68. № 4. С. 49–54.
37. Зербино Д. Д., Соломенчук Т. Н., Поспишиль Ю. А. Свинец – этиологический фактор поражения сосудов: основные доказательства // Архив патологии. 1997. Т. 59. № 1. С. 9–12.
38. Золотарёва О. Б., Асташев Б. А., Басевич В. В. Изменения концентрации церулоплазмينا в сыворотке крови больных острым инфарктом миокарда // Клиническая медицина. 1987. Т. LXV. № 7. С. 41–45.
39. Зорин С. Н., Баяржаргал М., Гмошинский И. В. и др. Комплексная оценка органических форм эссенциальных микроэлементов цинка, меди, марганца и хрома в опытах in vitro и in vivo // Вопросы питания. 2007. Т. 76. № 5. С. 74–79.
40. Иванов В. Н., Никитина Л. П., Анакина Л. В. и др. Биоселен – эффективное средство в лечении сердечно-сосудистых заболеваний // Морской медицинский журнал. 1997. Т. 4. № 1. С. 39–43.
41. Ивахненко В. И., Мальцев Г. Ю., Васильев А. В. и др. Активность антиоксидантных ферментов при недостаточном содержании в рационе белка и избытке Cu, Zn, Mn и Se // Вопросы питания. 2007. Т. 76. № 5. С. 11–16.
42. Коровина Н. А., Творогова Т. М., Гаврюшова Л. П. Применение препаратов магния при сердечно-сосудистых заболеваниях у детей // Лечащий врач. 2006. № 3. С. 10–13.
43. Кудрин А. В., Громова О. А. Микроэлементы в неврологии. М.: ГЭОТАР-Медиа, 2006. 304 с.
44. Кудрин А. В., Громова О. А. Микроэлементы в иммунологии и онкологии. М.: ГЭОТАР-Медиа, 2007. 544 с.
45. Кудрин А. В., Скальный А. В., Жаворонков А. А. и др. Иммунофармакология микроэлементов. М.: КМК, 2000. 537 с.
46. Лебедева У. М. Дефицитные состояния у детей Республики Саха (Якутия) (факторы риска, клинические проявления и коррекция): Автореф. дис. ... канд. мед. наук. М., 2007. 27 с.
47. Лобанова Л. П., Агбалян Е. В., Буганов А. А. Обеспеченность микронутриентами пришлого населения Крайнего Севера // Вопросы питания. 2007. Т. 76. № 5. С. 51–54.
48. Маликова А. Г. Микроэлементный спектр плазмы крови при геморрагическом инсульте: Автореф. дис. ... канд. мед. наук. М., 2008. 25 с.
49. Маликова А. Г., Уллубиев Н. М., Лапик Н. В. и др. Изменение спектра микроэлементов при геморрагическом инсульте // Журнал неврологии и психиатрии им. С. С. Корсакова. 2008. Т. 108. № 3. С. 76–79.

50. Марачев А. Г., Жаворонков А. А. Акклиматизационный дефицит железа // Физиология человека. 1987. Т. 3. № 4. С. 640–646.
51. Маслова Ж. В., Сусликов В. Л. Особенности распространенности артериальной гипертонии на территории некоторых субрегионов Чувашии // Терапевтический архив. 2008. № 9. С. 21–24.
52. Мерай И. А., Павликова Е. П., Александрия Л. Г. и др. Калия и магния аспарагинат при восстановлении и сохранении синусового ритма у больных с устойчивой формой фибрилляции предсердий // CONSILIUM MEDICUM. 2007. Т. 9. № 11. С. 81–83.
53. Невзорова В. А., Захарчук Н. В., Плотникова И. В. Блокаторы медленных кальциевых каналов в предупреждении цереброваскулярных катастроф // CONSILIUM MEDICUM. 2007. Т. 9. № 8. С. 14–17.
54. Нетребенко О. К. Влияние питания на развитие мозга // Педиатрия: Журнал имени Г. Н. Сперанского. 2008. Т. 87. № 3. С. 96–103.
55. Никитин Ю. П., Журавская Э. Я. Железодефицитные состояния и анемии в Сибири и на Севере. Новосибирск: Наука, 2003. 84 с.
56. Одинак М. М., Вознюк И. А., Мельникова Е. В. и др. Антиоксидантная эффективность б-липоевой кислоты при обратимой ишемии мозга // CONSILIUM MEDICUM. 2007. Т. 9. № 8. С. 18–21.
57. Павлова Л. А. Морфо-функциональные изменения головного мозга при патологии щитовидной железы в условиях макро- и микроэлементозов (клинико-нейропсихологическое и экспериментальное исследование): Автореф. дис. ... канд. мед. наук. М., 2005. 26 с.
58. Платонова Т. Н., Скоромец А. П., Шабалов Н. П. Кортексин – многолетнее применение в педиатрической практике // Кортексин – пятилетний опыт отечественной неврологии: Сб. статей под ред. А. А. Скоромца, М. М. Дьяконова. СПб.: Наука, 2005. С. 3–14.
59. Прокопенко В. М. Селеносодержащие белки и беременность // Журнал акушерства и женских болезней. 2002. Т. LI. Вып. 4. С. 73–76.
60. Работаев Е. Ф., Хохлова Е. А. Актуальные проблемы микронутриентной недостаточности в Чувашской Республике // Гигиена и санитария. 2009. № 1. С. 36–38.
61. Ребров В. Г., Громова О. А. Витамины и микроэлементы. М.: АЛЕВ-В, 2003. 670 с.
62. Румянцева С. А., Силина Е. В. Энергокоррекция и качество жизни при хронической ишемии мозга. М.: Медицинская книга, 2007. 60 с.
63. Румянцева С. А., Федин А. И., Силина Е. В. и др. Антиоксидантная нейропротекция при инсульте. СПб.: Тактик-Студио, 2008. 104 с.
64. Саракаева А. З. Макро- и микроэлементозы, дисфункция эндотелия и их взаимосвязи у больных артериальной гипертонией в условиях высокогорья: Автореф. дис. ... канд. мед. наук. Нальчик, 2007. 22 с.
65. Скальный А. В. Химические элементы в физиологии и экологии человека. М.: Издательский дом «ОНИКС 21 век»: Мир, 2004. 216 с.
66. Скальный А. В., Быков А. Т., Лимин Б. В. Диагностика, профилактика и лечение отравлений свинцом. М.: ВЦМК «Защита», 2002. 52 с.
67. Скальный А. В., Быков А. Т., Яцык Г. В. Микроэлементы и здоровье детей. М.: КМК, 2002. 133 с.
68. Скальный А. В., Орджоникидзе З. Г., Катулин А. Н. Питание в спорте: макро- и микроэлементы. М.: ОАО «Издательский дом “Городец”», 2005. 144 с.
69. Скальный А. В., Рудаков И. А. Биоэлементы в медицине. М.: Издательский дом «ОНИКС 21 век»: Мир, 2004. 272 с.
70. Скальный А. В., Яцык Г. В., Одинаева Н. Д. Микроэлементозы у детей: распространенность и пути коррекции. М.: КМК, 2002. 86 с.
71. Скворцова В. И. Лечение острого ишемического инсульта // Лечащий врач. 2004. № 7. С. 78–83.
72. Скворцова В. И., Нарциссов Я. Р., Бодыхов М. К. и др. Оксидантный стресс и кислородный статус при ишемическом инсульте // Журнал неврологии и психиатрии им. С. С. Корсакова. 2007. Т. 107. № 1. С. 30–36.
73. Скрипченко Н. Д. Влияние лечебно-профилактической диеты, обогащенной селеном, на клинико-метаболические показатели у больных сахарным диабетом 2 типа: Автореф. дис. ... канд. мед. наук. М., 2003. 23 с.
74. Смирнов А. Г., Чухловина М. Л., Жарская В. Д. и др. Влияние малых концентраций ртути на центральную нервную систему // Гигиена и санитария. 1998. № 2. С. 49–51.
75. Спасов А. А., Петров В. И., Иежица И. Н. и др. Магний (значение, дефицит, лекарственные средства и биологически активные добавки к пище) // Микроэлементы в медицине. 2004. Т. 5. Вып. 4. С. 133–135.
76. Стуров В. Г., Чупрова А. В., Антонов А. Р. Нарушения баланса эссенциальных минеральных элементов у детей с наследственными гематомезэнхимальными дисплазиями. Подходы к направленной метаболической коррекции // Вопросы питания. 2007. Т. 76. № 5. С. 60–66.
77. Сусликов В. П. Геохимическая экология болезней: В 2 т. Т. 2. Атомовиты. М.: Гелиос АРВ, 2000. 672 с.
78. Суслина З. А., Варакин Ю. Я., Верещагин Н. В. Сосудистые заболевания головного мозга: Эпидемиология. Основы профилактики. М.: МЕДпресс-информ, 2006. 236 с.
79. Танащян М. М., Домашенко М. А. Коррекция эндотелиальной дисфункции при хронических цереброваскулярных заболеваниях // CONSILIUM MEDICUM. 2008. Т. 10. № 7. С. 44–49.
80. Терещенко И. В. Дефицит магния в практике эндокринолога // Клиническая медицина. 2008. Т. 86. № 7. С. 51.
81. Уллубиев М. А. Изменения микроэлементов плазмы крови при ишемическом полушарном инсульте: Автореф. дис. ... канд. мед. наук. М., 2006. 22 с.
82. Федосеенко М. В., Ширяев Р. Р., Рюмин Д. В. и др. Биологическая роль магния, кальция и цинка в регуляции функций и развитии заболеваний пищеварительной системы // Вестник последипломного медицинского образования. 2003. № 2. С. 58–62.
83. Фельдман А. Г. Эколого-клиническое значение микроэлементов в развитии миастении: Автореф. дис. ... канд. мед. наук. Оренбург, 2004. 18 с.
84. Чепурная О. П. Особенности распространения артериальной гипертонии в биогеохимических субрегионах Чувашии // Микроэлементы в медицине. 2002. Т. 3. Вып. 3. С. 20–23.
85. Чепурненко С. А. Использование Магне В6 в целях повышения компенсаторно-адаптивных возможностей у юношей с первичным пролапсом митрального клапана // Клиническая медицина. 2008. Т. 86. № 7. С. 61–64.

86. Шазо Г., Гоголева И. В., Громова О. А. и др. Нейробиология лития // Журнал неврологии и психиатрии им. С. С. Корсакова. Инсульт: приложение к журналу. 2008. Вып. 22. С. 49–55.
87. Шакирова Е. Г. Изменения микроэлементов плазмы крови при болезни Паркинсона и синдроме паркинсонизма: Дис. ... канд. мед. наук. М., 2006. 121 с.
88. Шейбак М. П. Дефицит магния и его значение в патологии детского возраста // Российский вестник перинатологии и педиатрии. 2003. № 1. С. 45–48.
89. Эмсли Дж. Элементы. М.: Мир, 1993. 256 с.
90. Юдина Т. В., Гладков С. Ю., Федорова Н. Е. и др. Гигиенические проблемы ртутной безопасности: методические аспекты газортутного мониторинга, неинвазивного биотестирования // Микроэлементы в медицине. 2002. Т. 3. Вып. 3. С. 24–32.
91. Alissa E. M., Bahijri S. M., Lamb D. J. et al. The effects of coadministration of dietary copper and zinc supplements on atherosclerosis, antioxidant enzymes and indices of lipid peroxidation in the cholesterol-fed rabbit // *Int. J. Exp. Pathol.* 2004. Vol. 85. № 5. P. 265–275.
92. Bennett P. J. et al. Heavy metals in wild rice from northern Wisconsin // *Sci. Total. Environ.* 2000. Vol. 246. № 3. P. 261–269.
93. Bilgen I., Oner G., Edremittioğlu M. et al. Involvement of cholinergic receptors in cadmium – induced endothelial dysfunction // *J. Basic Clin. Physiol. Pharmacol.* 2003. Vol. 14. № 1. P. 55–76.
94. Choi S. H., Kim D. W., Kim S. Y. et al. Transduced human copper chaperone for Cu, Zn-SOD (PEP-1-CCS) protects against neuronal cell death // *Mol. Cells.* 2005. Vol. 20. № 3. P. 401–408.
95. Delva P. A. Lechi Intralymphocyte magnesium decrease in patients with primary aldosteronism. Possible links with cardiac remodeling // *Magnes. Res.* 2003. Vol. 16. № 3. P. 206–209.
96. Diener H. C., Schneider D., Lampl Y. et al. DP-b99, a membrane-activated metal ion chelator, as neuroprotective therapy in ischemic stroke // *Stroke.* 2008. Vol. 39. № 6. P. 1774–1778.
97. Frederickson C. J., Cuajungco M. P., Frederickson C. J. Is zinc the link between compromises of brain perfusion (excitotoxicity) and Alzheimer's disease? // *J. Alzheimers Dis.* 2005. Vol. 8. № 2. P. 155–160.
98. Frederickson C. J., Giblin L. J., Krezel A. et al. Concentrations of extracellular free zinc (pZn) in the central nervous system during simple anesthetization, ischemia and reperfusion // *Exp. Neurol.* 2006. Vol. 198. № 2. P. 285–293.
99. Fujimura M., Tominaga T., Chan P. Neuroprotective effects of an antioxidant in ischemic brain injury: involvement of neuronal apoptosis // *Neurocrit. Care.* 2005. Vol. 2. № 1. P. 59–66.
100. Gebel T. Confounding variables in the environmental toxicology of arsenic // *Toxicology.* 2000. Vol. 144. № 1–3. P. 155–162.
101. Hindmarsh J., Thomas J. Arsenic, its clinical and environmental significance // *J. Trace Elem. Exp. Med.* 2000. Vol. 13. № 1. P. 165–172.
102. Kaji T. Cell biology of heavy metal toxicity in vascular tissue // *Yakugaku Zasshi.* 2004. Vol. 124. № 3. P. 113–120.
103. Kbiela J. Selenium and the organism // *Cas. Lek. Cesk.* 1999. Vol. 138. № 4. P. 99–106.
104. Klevay L. M. Cardiovascular disease from copper deficiency – a history // *J. Nutr.* 2000. Vol. 130. Suppl. 2S. P. 489S–492S.
105. Kong X. K., Nicolakakis N., Kocharyan A. et al. Vascular remodeling versus amyloid beta-induced oxidative stress in the cerebrovascular dysfunctions associated with Alzheimer's disease // *J. Neurosci.* 2005. T. 48. № 25. P. 11165–11174.
106. Marchaluk E., Persson-Moschos M., Thorling E. B. et al. Variation in selenoprotein P concentration in serum from different European regions // *Eur. J. Clin. Nutr.* 1995. Vol. 49. № 1. P. 42–48.
107. Marniemi J., Alanen E., Impivaara O. et al. Dietary and serum vitamins and minerals as predictors of myocardial infarction and stroke in elderly subjects // *Nutr. Metab. Cardiovasc. Dis.* 2005. Vol. 15. № 3. P. 188–197.
108. Muller A. S., Pallauf J., Most E. Parameters of dietary selenium and vitamin E deficiency in growing rabbits // *J. Trace Elem. Med. Biol.* 2002. Vol. 16. № 1. P. 47–55.
109. Nanji A. A., Griniuvienė B., Sadrzaden S. M. N. et al. Effect of type of dietary fat and ethanol on antioxidant enzyme mRNA induction in rat liver // *J. Lipid. Res.* 1995. Vol. 36. № 4. P. 736–744.
110. Rao R., Georgieff M. K. Perinatal aspects of iron metabolism // *Acta Paediatr.* 2002. Suppl. 91. P. 124–129.
111. Razmara A., Sunday L., Stirone C. et al. Mitochondrial effects of estrogen are mediated by estrogen receptor alpha in brain endothelial cells // *J. Pharmacol. Exp. Ther.* 2008. Vol. 325. № 3. P. 782–790.
112. Schutte R., Nawrot T., Richart T. et al. Arterial structure and function and environmental exposure to cadmium // *Occup. Environ. Med.* 2008. Vol. 65. № 6. P. 412–419.
113. Singh A. K., Singh V., Pal Singh M. et al. Effect of immunosenescence on the induction of cardiovascular disease pathogenesis: role of peripheral blood mononuclear cells // *Immunopharmacol. Immunotoxicol.* 2008. Vol. 30. № 2. P. 411–423.
114. Skoczynska A., Stojek E., Gorecka H. et al. Serum vasoactive agents in lead-treated rats // *Int. J. Occup. Med. Environ. Health.* 2003. Vol. 16. № 2. P. 169–177.
115. Telisman S., Pizent A., Jurasovic J. et al. Lead effect on blood pressure in moderately lead-exposed male workers // *Am. J. Ind. Med.* 2004. Vol. 45. № 5. P. 446–454.
116. Tibbetts J. How arsenic acts. Evidence of oxidative stress // *Environ. Health. Perspect.* 2002. Vol. 110. № 4. P. A204.
117. Uno M., Kitazato K. T., Suzue A. et al. Contribution of an imbalance between oxidant-antioxidant systems to plaque vulnerability in patients with carotid artery stenosis // *J. Neurosurg.* 2005. Vol. 103. № 3. P. 518–525.
118. Vajragupta O., Boonchoong P., Sumanont Y. et al. Manganese-based complexes of radical scavengers as neuroprotective agents // *Bioorg. Med. Chem.* 2003. Vol. 11. № 10. P. 2329–2337.
119. Walsh K., Smith R. C., Kim H.-S. Vascular cell apoptosis in remodeling, restenosis and plaque rupture // *Circ. Res.* 2000. Vol. 87. P. 184–190.
120. Zheng W., Aschner M., F. Gherzi-Egea J. Brain barrier systems: a new frontier in metal neurotoxicological research // *Toxicol. Appl. Pharmacol.* 2003. Vol. 192. P. 1–11.

УДК 616.7 – 07 – 053.2

**ЛАРИСА ВЛАДИМИРОВНА КУЗНЕЦОВА**

кандидат медицинских наук, доцент кафедры педиатрии  
медицинского факультета, Петрозаводский государствен-  
ный университет  
*kuznetsov@onego.ru*

**АЛЕКСАНДР ЮРЬЕВИЧ МЕЙГАЛ**

доктор медицинских наук, профессор кафедры физиоло-  
гии человека и животных медицинского факультета, Пет-  
розаводский государственный университет  
*meigal@petrsu.ru*

**ТАТЬЯНА ВАЛЕНТИНОВНА ВАРЛАМОВА**

кандидат медицинских наук, доцент кафедры педиатрии  
медицинского факультета, Петрозаводский государствен-  
ный университет  
*varlamova@karelia.ru*

**АЛЕКСАНДР ЛЕОНИДОВИЧ СОКОЛОВ**

кандидат медицинских наук, доцент, заведующий кафед-  
рой педиатрии медицинского факультета, Петрозаводский  
государственный университет  
*pediatr@sampo.ru*

## **МЕТОДЫ НЕИНВАЗИВНОЙ ДИАГНОСТИКИ ПРИ СИНДРОМЕ ДВИГАТЕЛЬНЫХ НАРУШЕНИЙ У ДЕТЕЙ РАННЕГО ВОЗРАСТА**

Патология позвоночника и спинного мозга признается важной проблемой в нейропедиатрической практике. Особую актуальность в нейропедиатрии приобретает поиск диагностической модели, сочетающей в себе неинвазивность, доступность и высокую эффективность, а также возможность обеспечения скрининг-диагностики и мониторинга структурных изменений позвоночника и спинного мозга. Предлагается использовать для оценки структурных изменений головного мозга, позвоночника и спинного мозга у детей с синдромом двигательных нарушений перинатального генеза метод ультразвукографии, а функциональных – клинические проявления и нейрофункциональное обследование (ЭМГ, ЭНМГ).

Ключевые слова: перинатальное поражение ЦНС, синдром двигательных нарушений, ультразвукография, электронейромиография

Перинатальные поражения центральной нервной системы – актуальная проблема в нейропедиатрии. Среди всех синдромов раннего и восстановительного периодов перинатальной энцефалопатии синдром двигательных нарушений (СДН) встречается наиболее часто. По данным разных авторов, изолированно или в сочетании с другими синдромами его частота колеблется от 54 до 78 %. По этиологии СДН можно разделить на 3 группы: патология головного мозга, патология позвоночника и спинного мозга (спинальные нарушения), наследственные заболевания.

За последние годы неонатологам, невропатологам, нейрохирургам стало значительно проще и быстрее диагностировать перинатальные повреждения головного мозга у детей раннего возраста в связи с появившимся новым методом обследования – ультразвукографией (УС) головного мозга. Внедрение данного метода в клиническую практику сделало возможным раннее

выявление пороков развития, кровоизлияний и других патологических процессов головного мозга, позволило проследить в динамике течение заболевания на фоне проводимого лечения.

Патология позвоночника и спинного мозга признается важной проблемой в нейропедиатрической практике. По данным ряда авторов, ее распространенность колеблется от 2,5 до 30 % [4], [10], [11], [15], [16], [17], [18], [19], [20], [23], [26], [30], [32]. Однако многие авторы считают, что заболевания позвоночника и спинного мозга, приводящие к неврологическим расстройствам, встречаются в детской практике значительно чаще, чем распознаются. Это обусловлено ограничениями объективной диагностики, поскольку она связана либо с рентгеновским облучением ребенка, либо с использованием дорогостоящего и малодоступного метода – магнитно-резонансной томографии (МРТ). Особенно затруднительна диагностика патологии позвоночника и спинного мозга у новоро-

жденных и детей младшего возраста, так как для получения качественных рентгенограмм или МР-изображений необходима фиксация ребенка или наркоз. Даже при соблюдении этих условий высока вероятность получения недостаточно информативных данных. Кроме того, наркоз сам по себе имеет ограничения и осложнения, поэтому должен применяться по строгим показаниям. Поэтому особую актуальность в нейрорепедиатрии приобретает поиск диагностической модели, сочетающей в себе неинвазивность, доступность и высокую эффективность, а также возможность обеспечения скрининг-диагностики и мониторинга структурных изменений позвоночника и спинного мозга.

СДН проявляется повышением или снижением двигательной активности, гипо- или гипертонией, моно- или гемипарезом (реже тетрапарезом), подкорковыми гиперкинезами. Мышечная гипотония чаще возникает при поражении мозжечка или передних рогов спинного мозга. При этом снижены спонтанная активность, сухожильные рефлексы, мышечный тонус. При мышечной гипертонии также снижена двигательная активность, но имеется общая скованность из-за высокого мышечного тонуса, особенно в приводящих мышцах рук и ног, сгибателях рук и разгибателях ног, шеи, спины. Врожденные рефлексы имеют парадоксальную динамику: угнетение рефлексов сосания, глотания, опоры, автоматической походки, ползания наряду с усилением, а в дальнейшем с задержкой обратного развития рефлексов орального автоматизма, Робинсона, Бабкина, шейно-тонического. Электромиографические исследования позволяют уточнить локализацию очага и выявить субклинические двигательные расстройства. Наиболее неблагоприятными прогностическими признаками являются длительная адинамия, мышечная гипотония, отсутствие сосания и глотания, раннее выявление шейно-тонического рефлекса [22].

При оценке неврологического статуса применяются традиционные методики, а также используются принципы, изложенные А. Ю. Ратнером [19]. При клиническом осмотре выделяют: наличие или отсутствие неврологической симптоматики, деформации позвоночника, диспластические проявления, нарушение общего состояния.

Двигательная система человека проходит длительный этап постнатального созревания, который включает в себя становление как скелетной мускулатуры, так и нервных центров [1], [2]. Физиологические и морфологические свойства двигательных единиц также претерпевают постнатальные изменения [5], [33], [35].

Частота импульсации двигательных единиц в мышцах верхних и нижних конечностей у детей практически одинакова. Это свидетельствует об отсутствии градиента убывания частот двигательных единиц (ДЕ) в кранио-каудальном направлении, характерном для взрослых [14], что является следствием недифференцированности размеров мотонейронов верхних и нижних сегментов в раннем постнатальном периоде [36].

Мышечная часть двигательной единицы созревает несколько позднее нейронной части, поэтому к моменту рождения двигательные единицы новорожденных по своим механическим свойствам не полностью дифференцированы на быстрые и медленные [36], а дифференциация волокон на окислительные, гликолитические и окислительно-гликолитические происходит из недифференцированных волокон вплоть до двухлетнего возраста [24].

Миелинизация проводников спинного мозга, за исключением пирамидных путей и оливоспинального пути (миелинизация начинается в 2–3 месяца и заканчивается к 3–4 годам), протекает интенсивно до 3–8 месяцев. Периферические спинномозговые нервы новорожденных детей по сравнению со взрослыми тонкие и достигают размеров взрослых только к 2–3 годам [13].

Таким образом, наиболее активный подъем величин скорости проведения импульса по нервам верхних конечностей отмечается в первом полугодии жизни (преимущественно в первые 3 месяца), обеспечивая развитие двигательных функций рук; по нервам нижних конечностей – во втором полугодии жизни (максимально в 9–12 месяцев), когда происходит реализация формирования основных двигательных функций ног – стояния и ходьбы.

Исследование мышечного тонуса и двигательной активности ребенка представляется надежным источником информации о состоянии нервно-мышечной системы. Изучая состояние мышечного тонуса у ребенка, формирующего его спонтанную двигательную активность, мы получаем возможность судить о состоянии нервно-мышечного аппарата, что имеет важное значение при диагностике нарушений нервной системы у детей. Эти нарушения бывают на самых разных ее уровнях, следовательно, поднимается вопрос топического диагноза. Для решения этой задачи у детей широко используются методы электромиографического исследования [3], [8], [9].

Электромиография (ЭМГ) в норме характеризуется следующими показателями [28]:

1. Дыхательные изменения мышечного тонуса (при глубоком вдохе происходит усиление потенциалов, более выраженное в мышцах верхних конечностей);
2. Синергические изменения тонуса (нерезкое повышение амплитуды биопотенциалов. Наиболее интенсивна электрическая активность при симметричных синергиях. Это обусловлено тем, что мотонейроны этих мышц близки функционально и расположены на одном сегментарном уровне);
3. Отдаленные синергии (активная и синергические мышцы иннервационно связаны с различными уровнями цереброспинальной оси);
4. Латентный период при произвольном сокращении не более 100–250 мсек;
5. Время появления первого колебания произвольного движения до максимальной амплитуды не больше 150–200 мс;

6. Быстрота прекращения электрической активности мышцы (период между сигналом к прекращению движения и полным отсутствием осцилляций) не более 200–250 мс;
7. Устойчивость средней амплитуды колебаний в течение каждой фазы активного сокращения;
8. Четкое различие интенсивности процессов в «ведущих» и «вспомогательных» мышцах.

Патологические изменения, выявляемые при глобальной ЭМГ:

1. Денервация мышцы: появление спонтанной электрической активности – потенциалов фибрилляций (возникает через 2–3 недели после денервации и определяется в течение 80–90 дней);
2. При повреждении сегментарных мотонейронов: на ранних стадиях появляются неритмичные, нерегулярные, неодинаковые по амплитуде отдельные или групповые потенциалы фасцикуляций;
3. Спастическая мышца: низковольтажные (до 10 мкВ) и частые колебания, расслаблений нет;
4. Экстрапирамидные нарушения: значительный по амплитуде колебательный процесс, который течет непрерывно или разделен на ритмичные залпы;
5. Экстрапирамидные гиперкинезы: при синергиях резкое увеличение электрической активности;
6. Переднероговое поражение: нарастание амплитуды фасцикуляций при синергиях;
7. Вялый периферический паралич: нет усиления ЭМГ как во время вдоха, так и при синергиях;
8. Спастический парез: замедление начала появления колебаний потенциала (увеличение латентного периода до 400–600 мсек). Увеличение рекрутирования до 400 мсек и более, снижение амплитуды до 130 мкВ при норме до 800–1000 мкВ. Колебательный процесс прекращается позже, чем сигнал к окончанию движения (феномен «продленной» активности) до 5–10 сек при норме 0,5 сек. Неустойчивость амплитуд колебаний потенциала на разных фазах движений. Относительно одинаковая интенсивность электрогенеза в «ведущей» и «вспомогательной» мышцах;
9. Переднероговое поражение: нарастание амплитуды фасцикуляций при синергиях.

Таким образом, ЭМГ позволяет определить уровень поражения при двигательных нарушениях (надсегментарный, спинальный, невралный, мышечный); выявить периферическую невропатию.

Электронейромиография (ЭНМГ) – метод регистрации и изучения биоэлектрической активности мышц и нервов. ЭНМГ включает в себя определение параметров М-ответа, скорость проведения импульса (СПИ) по двигательным и чувствительным нервам, регистрацию F-волны, Н-рефлекса, Т-рефлекса, мигательного рефлекса, тестирование нервно-мышечного соединения и др. ЭНМГ-методы позволяют косвенно говорить о

нарушениях структуры спинного мозга и периферических нервов. Однако в несравнимо большей степени ЭНМГ-методы позволяют оценить функциональное состояние нервно-мышечного аппарата как ответ системы на внутренние и внешние воздействия в норме и при патологии.

Следовательно, применение совокупности ЭНМГ-методов исследования у детей раннего возраста позволяет оценить истинное функциональное состояние мотонейронов надсегментарных структур, периферических нервов, спинного мозга и нервно-мышечного аппарата, помогает выявить локализацию поражения, соотношение органических повреждений со степенью нарушенных функций, контролировать динамику нарушенных функций, определить стадию и характер патологического процесса, что играет большое значение в терапии и прогнозе заболевания.

Спинальная УС – способ оценки структурного состояния позвоночника и спинного мозга методом ультразвукового сканирования, проводимого в продольных и поперечных плоскостях линейным и конвексным датчиками частотой от 3,5 до 12 МГц, располагаемыми на коже над остистыми отростками позвонков. Оценка осуществляется путем сравнения полученных данных с эталонными изображениями. Последние определены при сканировании позвоночника и содержимого позвоночного канала в условиях нормы и патологии. Основные элементы эхо-архитектоники при спинальной УС уточнены путем сопоставления данных УС, МРТ и стереоанатомии, полученных в идентичных плоскостях исследования. При необходимости могут использоваться нестандартные плоскости сканирования (например, передний доступ), другие ультразвуковые датчики и режимы УС [12], [10].

Показания к проведению спинальной УС: патология родов (затруднение выведения плечиков, обвитие пуповиной вокруг шеи, длительный потужной период, применение пособия в родах по типу бинта Вербова, быстрые и стремительные роды и т. д.); двигательные нарушения (нейрогенная кривошея, паретическая установка кистей рук, снижение мышечного тонуса в плечевом поясе, синдром гипервозбудимости – раздраженный крик, гиперестезия, положительный симптом Грефе и т. д.); асимметрия конечностей (трофические нарушения); видимые изменения в области позвоночника (гипертрихоз, выпячивания или втяжения и т. д.). Противопоказанием является тяжелое состояние новорожденных с нарушениями дыхания и сердечной деятельности.

Спинальная УС может проводиться с помощью любой современной ультразвуковой диагностической системы, например SSD-1200 (Aloka, Япония), SDU-500 (Shimadzu, Япония), имеющей электронные линейные и/или конвексные датчики с частотой в диапазоне от 3,5 до 12 МГц. Для диагностики и мониторингирования структурных изменений позвоночника и спинного мозга применяется В-сканирование в режиме

реального времени с анализом динамического и статического изображения УС-картины на экране аппарата. Документирование исследования должно осуществляться на видеопленку. Дополнительные возможности дает использование доплерографии, цветового доплеровского картирования и режима энергетического доплера.

Спинальная УС проводится по методике, предложенной А. С. Иова [10], в продольной (сагиттальной) и поперечной (аксиальной) плоскостях с использованием датчиков линейного сканирования. Специальной подготовки пациентов не требовалось.

Новорожденных неонатолог (или мать) держал на ладони, лицом вниз, удерживая голову ребенка в среднем положении, при необходимости (и возможности) проводил сгибание в шейном отделе. При исследовании в сагиттальной плоскости датчик располагали над остистыми отростками или параллельно им, на 0,5–1 см правее или левее. При поперечном сканировании датчик располагали перпендикулярно предыдущей плоскости, на уровне межпозвоноковых дисков. Оценка структурного состояния спинного мозга, позвоночника при использовании УС заключалась в линейном измерении ширины позвоночного канала, сагиттального и аксиального размера спинного мозга, оценки состояния субарахноидальных пространств, формы и целостности позвонков; стабильности или нестабильности позвоночно-двигательных сегментов (ПДС). При необходимости использовались датчики конвексного сканирования (при исследовании краниоцервикального перехода). Разработанная модифицированная методика УС позвоночника и спинного мозга, уточнена нормальная УС-анатомия позвоночника и спинного мозга, описаны основные УС-симптомы и УС-синдромы патологических структурных изменений позвоночника и спинного мозга, изучены диагностические возможности и перспективы УС в выявлении структурных изменений позвоночника и спинного мозга у новорожденных [4].

Шейный отдел позвоночника доступен для УС-исследования в любом возрасте, у 92 % детей можно проследить основные элементы спинномозгового канала (СМК): костные стенки, спинной мозг (СМ), субарахноидальные пространства (САП), зубовидные связки. Секторный или конвексный датчик позволяет оценить правильность соотношений краниоцервикального перехода. Проведение функциональных проб позволяет выявить нестабильность в шейных ПДС в режиме реального времени.

Шейное утолщение в сагиттальной плоскости сканирования не определяется. Чаще всего сагиттальный размер спинного мозга у доношенных новорожденных 4–5 мм. Ширина спинномозгового канала в сагиттальной проекции составляет 9–10 мм и не меняется от С3 до С6. На уровне С2 спинномозговой канал шире, начиная от С7 он сужается. Расположение спинного мозга

чаще центральное, хорошо виден центральный канал. Расстояние между телами позвонков в норме 1–1,5 мм, а на уровне С2–С3 – до 2 мм. Хорошо прослеживается эпидуральное пространство. Эти размеры коррелируют с данными, полученными другими исследователями при рентгенологическом и морфологическом методах обследования. Позвоночный канал у новорожденных относительно широкий, что объясняет исключительную редкость сдавления спинного мозга при вывихах позвонков или спинальных оболочечных кровоизлияниях.

Легко определяется уровень расположения конуса спинного мозга, визуализируются эпидуральное пространство, конский хвост (*cauda equina*) и пр. У новорожденных спинной мозг заканчивается на уровне L1–L2 позвонков, к 3 годам – на уровне L1 позвонка, в более старшем возрасте он соответствует Th12 позвонку или межпозвоночному диску Th12–L1. Более низкое расположение конуса по отношению к указанной норме может свидетельствовать о синдроме фиксированного спинного мозга. Это требует проведения детальной неврологической оценки и использования более информативных диагностических методов нейровизуализации (МРТ). У новорожденных с синдромом двигательных нарушений, обусловленным повреждением шейного отдела позвоночника в родах, выявлены следующие УС-феномены патологии: 1) нестабильность позвоночно-двигательных сегментов (чаще всего в С3–С4 сегментах – до 43 %, что коррелирует с данными рентгенодиагностики различных авторов); 2) неровность контуров спинного мозга, веретенообразное утолщение в проекции С3–С5–С6 позвонков – 47 %; 3) недифференцированность переднего контура позвоночного канала (трудно проследить контуры тел и дисков) – 33 %; 4) гиперэхогенность задней продольной связки – 16 %; 5) гиперэхогенность мягких тканей позади трахеи – 10 % (чаще выявляется у детей с обвитием пуповиной); 5) снижение высоты дисков в позвоночно-двигательных сегментах – 6 %.

Клинико-сонографические параллели: при кривошее преобладали следующие УС-феномены: нестабильность ПДС, недифференцированность переднего контура позвоночного канала, веретенообразное утолщение СМ. При синдроме гипервозбудимости наиболее часто встречались: гиперэхогенность задней продольной связки, недифференцированность переднего контура позвоночного канала, снижение высоты дисков в ПДС; при снижении мышечного тонуса в плечевом поясе – нестабильность ПДС, недифференцированность переднего контура позвоночного канала, веретенообразное утолщение СМ, гиперэхогенность задней продольной связки.

Главными преимуществами спинальной УС являются возможность визуализации основных элементов топографии позвоночника и содержимого позвоночного канала, безболезненность, безвредность, быстрота получения информации,

отсутствие необходимости специальной подготовки пациента к исследованию, а также экономическая и техническая доступность.

Таким образом, спинальная ультрасонография является неинвазивным, не требующим подготовки пациента, доступным, экономически выгодным методом обследования, а также обладает рядом преимуществ: позволяет оценить позвоночно-двигательные сегменты, спинной мозг и провести функциональные пробы в режиме реального времени; движения пациента не влияют на результаты УС-исследования.

Несомненными преимуществами УС являются визуализация пульсации спинного мозга и возможность проведения функциональных проб в режиме реального времени для выявления нестабильности позвоночно-двигательных сегментов в шейном, поясничном отделах позвоночника. Спинальная УС может стать альтернативой широкому использованию рентгенографии позвоночника в диагностике нестабильности позвоночно-двигательных сегментов у детей.

## ВЫВОДЫ

В комплексной оценке структурно-функциональных изменений головного мозга, позвоночника и спинного мозга у детей с синдромом

двигательных нарушений перинатального генеза наиболее простым и достаточно эффективным методом контроля структурного состояния является ультрасонография, а функционального – клинические проявления и нейрофункциональное обследование (ЭМГ, ЭНМГ). При наличии клинических признаков патологии двигательной системы диагностическая тактика должна быть построена на принципах минимальной инвазивности и минимальной достаточности. Поэтому наиболее целесообразными представляются клиническое обследование, ЭМГ, УС-скрининг (УС мозга + спинальная УС), в зависимости от данных которого определяется последовательность дальнейших мероприятий. Если речь идет о патологии спинного мозга, то методом выбора является МРТ. Патология преимущественно позвоночника, без вовлечения спинного мозга, предполагает использование в качестве метода выбора КТ-исследования с трехмерной пространственной реконструкцией зоны интереса. Сохраняет значение рентгеноспондилография: в остром периоде позвоночной травмы рентгенография является методом выбора. Инвазивные технологии исследования структурных изменений спинного мозга должны применяться только в том случае, если нет возможности сделать МРТ.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Аршавский И. А. Очерки по возрастной физиологии. М.: Медицина, 1967. 475 с.
2. Аршавский И. А. Принцип доминанты в индивидуальном развитии организма // Журнал высшей нервной деятельности. 1993. Т. 43. № 4. С. 785–794.
3. Бадалян Л. О., Скворцов И. А. Клиническая электромиография: Руководство для врачей. М.: Медицина, 1986. 368 с.
4. Барашнев Ю. И. Перинатальная неврология. М.: Триада-Х, 2001. 640 с.
5. Бурсиан А. В. Ранний онтогенез моторного аппарата теплокровных. Л.: Наука, 1983. 165 с.
6. Ватолин К. В., Пыков М. И., Биджиев М. И., Васильева О. Ю., Галкина Я. А., Попов М. А. Методика исследования, ультразвуковая семиотика и данные морфометрии спинного мозга и позвоночного канала у новорожденных // Ультразвуковая и функциональная диагностика. 2003. № 1. С. 51–57.
7. Ватолин К. В., Пыков М. И., Биджиев М. И., Васильева О. Ю., Галкина Я. А., Попов М. А. Ультразвуковая оценка различных форм спинномозговых грыж и сопутствующих дизрафических процессов у новорожденных // Ультразвуковая и функциональная диагностика. 2003. № 2. С. 51–57.
8. Гехт Б. М. Теоретическая и клиническая электромиография. Л.: Наука, 1990. 229 с.
9. Зенков Л. Р., Ронкин М. А. Функциональная диагностика нервных болезней: Руководство для врачей. М.: Медицина, 1991. 640 с.
10. Иова А. С., Гармашов Ю. А., Андрущенко Н. В., Паутницкая Т. С. Ультрасонография в нейрорепедиатрии (возможности и перспективы). СПб.: Изд-во «Петроградский и К.», 1997. 160 с.
11. Клиника и диагностика родовой спинальной травмы у новорожденных детей: Метод. рекомендации / Министерство здравоохранения СССР; Сост. Г. Ф. Холкина. Новокузнецк, 1988. 20 с.
12. Кузнецова Л. В. Возможности и перспективы ультрасонографии в ранней диагностике заболеваний позвоночника и спинного мозга у детей: Автореф. дис. ... канд. мед. наук. СПб., 2000. 24 с.
13. Маркосян А. А. Основы морфологии и физиологии организма детей и подростков. М.: Медицина, 1969. 574 с.
14. Мейгал А. Ю., Соколов А. Л., Лупандин Ю. В. Терморегуляционная активность двигательных единиц новорожденных и детей раннего возраста // Физиология человека. 1995. Т. 21. № 4. С. 111–118.
15. Михайлов М. К. Рентгенодиагностика родовых повреждений позвоночника. М.: ГЭОТАР-Медиа, 2001. 117 с.
16. Назинкина Ю. В. Рентгенодиагностика родовых повреждений межпозвонковых дисков у новорожденных и в отдаленном периоде травмы // Позвоночно-спинномозговая травма: Сб. науч. трудов / Под ред. А. А. Луцка. Новокузнецк, 1988. С. 43–45.
17. Назинкина Ю. В. Родовая травма шейного отдела спинного мозга у новорожденных // Позвоночно-спинномозговая травма: Сб. науч. трудов / Под ред. А. А. Луцка. Новокузнецк, 1988. С. 39–41.
18. Петрухин А. С. Неврология детского возраста. М.: Медицина, 2004. С. 369–371.
19. Ратнер А. Ю. Неврология новорожденных. М.: Бином. Лаборатория знаний, 2006. 368 с.
20. Руководство по неонатологии / Под ред. Г. В. Яцык. М.: Медицинское информационное агентство, 1998. 400 с.
21. Садофьева В. И. Нормальная рентгеноанатомия костно-суставной системы у детей. Л.: Медицина, 1990. 216 с.
22. Скоромец А. А., Скоромец А. П., Скоромец Т. А., Тиссен Т. П. Спинальная ангионеврология: Руководство для врачей. СПб.; М.: МЕДпресс-информ, 2003. 608 с.



23. Сотникова К. А., Барашнев Ю. И. Дифференциальная диагностика заболеваний новорожденных. Л.: Медицина, 1982. 216 с.
24. Тамбовцева Р. В. Гистохимическая характеристика мышечных волокон двуглавой и трехглавой мышц плеча в онтогенезе человека // Архив анатомии, гистологии, эмбриологии. 1988. Т. 94. № 5. С. 59–63.
25. Топографо-анатомические особенности новорожденного / Под ред. Е. М. Маргорина. Л.: Медицина, 1977. С. 210–220.
26. Ульрих Э. В. Аномалии позвоночника у детей. СПб.: Сотис, 1995. 334 с.
27. Шоломов И. И. Родовая травма шейного отдела позвоночника и спинного мозга (клиника, диагностика, лечение): Автореф. дис. ... д-ра мед. наук. СПб., 1995. 39 с.
28. Юсевич Ю. С. Очерки по клинической электромиографии. М.: Медицина, 1972. 95 с.
29. Янакова О. М., Садофьева В. И. Роль эхоспондиллографии в раннем выявлении пороков развития, перинатальной травмы позвоночника у детей раннего возраста // Патология крупных суставов и другие актуальные вопросы детской травматологии и ортопедии: Материалы симпозиума детских ортопедов-травматологов. Ижевск, 1998. С. 42–44.
30. Cohen M. D., Edwards M. K., Descer B. C. MR-imaging of children. New York: Raven. Press, 1990. 1090 p.
31. Coley B. D. at all. Diagnostic interventional ultrasound of the pediatric spine // *Pediatr. Radiol.* 2001. Vol. 31. P. 775–785.
32. Dachling Pang. Disorders of the pediatric spine. Raven. Press, New York, 1995. 275 p.
33. De Luca C. J., Ramen G. Motor unit firing behavior in older adults // *Rehabil. Res. Dev.* 1991. Vol. 28. P. 232.
34. Gerscovich E. O., McGahan J. P. Ultrasound of the spinal canal in the young child // *J. Ultrasound.* 1999. № 18. Vol. 9. P. 655–664.
35. Jones S. P., Ridge R. M. Motor unit in a skeletal muscle of neonatal rat: mechanical properties and weak neuromuscular transmission // *J. Physiol. (Gr. Brit.)*. 1987. Vol. 38. P. 355–375.
36. Skoglun S. Growth and differentiation with special emphasise on the central nervous system // *Ann. Rev. Physiol.* 1969. Vol. 31. P. 19.

УДК 616-002.77

**ЮРИЙ МИХАЙЛОВИЧ МАРКЕЛОВ**

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

**ЛЮДМИЛА ВЛАДИМИРОВНА ЩЕГОЛЕВА**

кандидат технических наук, доцент, и. о. заведующего кафедрой прикладной математики и кибернетики математического факультета, Петрозаводский государственный университет  
*schegoleva@psu.karelia.ru*

**МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ РАСПРОСТРАНЕНИЯ  
БАЦИЛЛЯРНОГО ТУБЕРКУЛЕЗА**

На основе данных статистики о динамике бациллярных больных создана математическая модель формирования «бациллярного ядра». Результаты, полученные с использованием математической модели распространения бациллярного туберкулеза, совпадают с известной эпидемиологической моделью и подтверждают, что общая медицинская сеть выявляет всего лишь около 45 % находящихся на территории Карелии бациллярных больных, а также положение стратегии DOTS о том, что регрессию «бациллярного ядра» можно получить при выявлении не менее 70 % бациллярных больных и абациллирования не менее 85 % выявленных больных.

Ключевые слова: невыявленные бациллярные больные, математическая модель, прогнозирование эпидемиологической ситуации по туберкулезу

Известно, что наиболее значимым фактором распространения туберкулеза (ТБ) в обществе является сохранение значительного количества бациллярных больных [2]. В связи с этим, согласно принятой ВОЗ стратегии DOTS, для улучшения эпидемиологической ситуации по ТБ необходимо ежегодно выявлять не менее 70 % бациллярных больных и излечивать (абациллировать) не менее 85 % из них [7], [9]. Условно бациллярных больных можно поделить на три группы: впервые выявленных (зарегистрированных) больных; больных, ранее выявленных, но неэффективно пролеченных (контингентов-бактериовыделителей), продолжающих, как правило, выделять лекарственно-устойчивые штаммы микробактерий туберкулеза (МБТ); невыявленных и незарегистрированных на данной территории бациллярных больных [2]. Анализ многолетней динамики заболеваемости ТБ в Республике Карелия показал, что даже в относительно благоприятный период

(1980-е годы) кривая заболеваемости имела волнообразный характер, что свидетельствует о недоувязывании значительного числа бациллярных больных, являющихся источниками заражения и возникновения новых случаев ТБ. Согласно наиболее крупномасштабному исследованию с участием 86 экспертов ВОЗ, охватившему 212 стран [6], в 1997 году в России выявлялось менее 50 % случаев ТБ с бактериовыделением. Ряд показателей свидетельствует о сохранении в Республике Карелия более неблагоприятной, чем в России, эпидемиологической ситуации по ТБ [4], [5]. О поздней диагностике и невыявлении значительной части больных свидетельствуют высокий удельный вес деструктивных форм ТБ среди впервые выявленных больных в Республике Карелия, превышающий в 2008 году на 30 % аналогичный показатель по РФ (62,8 % в РК, 46,8 % в РФ), высокая смертность от ТБ среди населения, превышающая аналогичный показатель по

Северо-Западу РФ на 24 %, а также высокий удельный вес умерших в течение 1 года с момента выявления ТБ, превышающий аналогичный показатель по РФ в 1,5–2 раза (рис. 1).

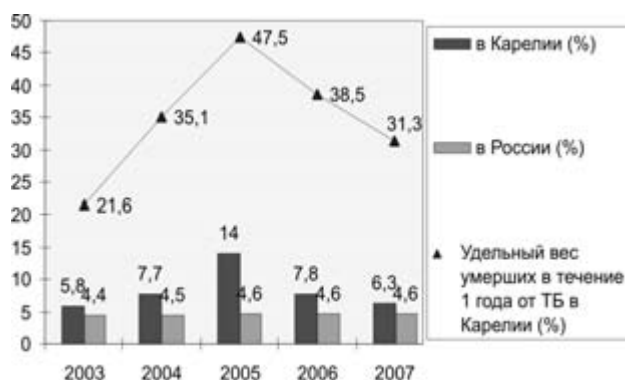


Рис. 1. Удельный вес умерших в течение 1 года с момента выявления ТБ среди впервые выявленных больных (в Карелии и России), 2003–2007 годы (в %)

Целью данной работы явилось выяснение количества невыявленных бациллярных больных и создание математической модели распространения бациллярного ТБ для прогнозирования эпидемиологической ситуации по ТБ и оценки влияния на нее различных факторов. На основе анализа 306 историй болезни больных легочным ТБ и статистических данных о количестве зарегистрированных бациллярных больных и их динамике в 2000–2007 годах (отчетные ф. 33, табл. 2400 и ф. 8), а также известного положения о том, что один бациллярный больной в течение года инфицирует 10 человек, из которых у 10 % разовьется заболевание ТБ, из них у 50 % с бацилловыделением (0,5 случая) [3], [8], нами была разработана математическая модель расчета количества бациллярных больных в регионе.

В таблице представлено движение бациллярных больных по статистической отчетной форме (ф. 33, табл. 2400) для Республики Карелия. Как видно из таблицы, в среднем количество впервые выявленных бациллярных больных по территории (241,8) на 15–16 % превышало количество бациллярных больных из числа местных жителей (203,9). Как правило, эта категория представлена бомжами, мигрантами, а также находящимися в СИЗО или в местах лишения свободы (МЛС) больными. В данной категории граждан, как правило, выявляются запущенные, распространенные деструктивные формы ТБ. Эти больные также склонны к нарушениям режимов химиотерапии (ХТ) и отрывам от лечения, заканчивающимся неэффективным курсом ХТ. Отрывы от лечения, по данным разных авторов, колеблются от 10 до 20 % (по статистическим данным, в Карелии отрывы от лечения составляют около 10 % ( $B = 0,1$ )). Несмотря на это, данная группа, пополняя ряды контингентов-бактериовыделителей, не имея регистрации, не попадает в диспансерные группы наблюдаемых бациллярных больных (ф. 33, табл.

2400) (см. таблицу). Как видно из таблицы, летальность бациллярных больных составила 21 % (116,5 от 552,9), в том числе 14 % от ТБ (77,3 от 552,9) и 7 % от других причин (39,3 от 552,9). Летальность впервые выявленных бациллярных больных составила 11,3 % от ТБ и 7 % от других причин ( $C_b = 0,18$ ), абациллирование – 66 % ( $V_b = 0,66$ ). Пополнение бактериовыделителей из числа контингентов, состоящих на диспансерном учете (ДУ), осуществлялось из I и II групп ДУ – 11,2 % (39 из 349,3) ( $A1 = 0,112$ ), рецидивы составили 7,6 % (26,4 из 349,3) ( $A2 = 0,076$ ). Количество прибывших из других регионов и убывших различалось незначительно. Удельный вес контингентов, снятых с бациллярного учета (в связи со смертью и абациллированием), составил 25,6 % ( $A3 = 0,25$ ). Коэффициент заболевания бациллярной формой ТБ ( $Z = 0,5$ ) взят из общепринятой модели распространения ТБ: 1 бациллярный больной в течение года инфицирует 10 человек, из которых 10 % (1 чел.) заболевают ТБ (из них 50 %, или 0,5 случаев, – бациллярным ТБ). Известно также, что в доантибактериальный период, до применения туберкулостатических препаратов, около 1/3 больных умирало от ТБ ( $C_n = 0,33$ ), у 1/3 процесс переходил в хроническую форму, у 1/3 наступало самоизлечение ( $V_n = 0,33$ ). Математическая модель распространения бациллярных форм ТБ может быть представлена системой конечно-разностных уравнений:

$$\begin{cases} S(t+1) = S(t) - S_b(t) - \\ - S_y(t) + S_b(t) \cdot (B \cdot Z + (1-B) \cdot Z \cdot W) + \\ + S_n(t) \cdot Z + S_x(t) \cdot (1 + A1 + A2) \cdot Z \\ S_y(t) = S_n(t) \cdot (V_n + C_n) = (1-K) \cdot S(t) \cdot (V_n + C_n) \\ S_x(t+1) = S_x(t) \cdot (1 + A1 + A2) \cdot (1 - A3) + S_b(t) \cdot B + \\ + S_b(t) \cdot (1 - C_b - V_b - B) \cdot (1 - U) \\ S_b(t) = K \cdot S(t) \\ S_n(t) = (1 - K) \cdot S(t) \end{cases}$$

где  $S_x(t)$  – количество хронических больных на конец года  $t$ ;  $S_n(t)$  – количество невыявленных больных в году  $t$ ;  $S_b(t)$  – количество выявленных больных в году  $t$ ;  $S_y(t)$  – количество ушедших из невыявленных больных (умерших и выздоровевших) в году  $t$ ;  $S(t)$  – количество всех неизвестных больных в году  $t$ ;  $W$  – поправочный коэффициент заразности для выявленных больных ( $W = 0,195$ );  $U$  – коэффициент абациллирования получивших дополнительное лечение в связи с МЛУ (процент от числа выявленных за минусом умерших, выздоровевших и ушедших) ( $U = 0,3$ );  $K$  – коэффициент выявления.

Неизвестный коэффициент выявления  $K$  был рассчитан исходя из модели на основе статистических данных о количестве впервые выявленных больных и количестве контингентов за 2000–2007 годы и составил 0,45.

Движение бациллярных больных в Республике Карелия (2000–2007 годы,  
учетные формы; ф. 8, ф. 33, табл. 2400)

Год	Впервые выявленные с МБТ (+)		Контингенты с МБТ (+) (ф. 33)							Умерло			Перестали выделять МБТ	Всего состоит на конец года с МБТ (+)
	Всего на территории РК (ф. 8)	Из них местные жители (ф. 33)	Всего	Из I и II групп ДУ (ранее абациллированных)	Рецидивы			Прибыло из других ЛПУ	Выбыло в другие регионы	От ТБ	От других причин	Всего		
					Из III группы ДУ	Из снятия с ДУ	Всего							
2000	239	176	422	48	4	11	15	71	47	53	30	80	125	598
2001	234	187	391	36	4	10	14	54	52	81	35	116	143	578
2002	248	193	362	55	7	30	37	49	61	98	38	136	159	555
2003	249	216	342	41	3	14	17	50	47	86	44	130	139	558
2004	239	200	343	31	13	19	32	35	56	60	45	105	153	542
2005	249	220	341	40	13	21	34	46	50	86	40	126	145	561
2006	235	211	313	35	18	11	29	39	40	74	48	122	189	524
2007	241	226	281	26	12	21	33	30	44	80	34	114	174	507
Средние М	241,8	203,6	349,3	39,0	9,3	17,1	26,4	46,8	49,6	77,3	39,3	116,5	153,4	552,9

2005 год

«хроники»  
341

выявлено  
220

2006 год

$$\left[ \begin{array}{c} \text{осталось} \\ \text{невывявленных} \\ 1/3 X \end{array} + \begin{array}{c} \text{выявленные} \\ \text{заразились} \\ 30 \end{array} + \begin{array}{c} \text{невывявленные} \\ \text{заразились} \\ 1/2 X \end{array} + \begin{array}{c} \text{«хроники»} \\ \text{заразились} \\ 203 \end{array} + \begin{array}{c} \text{оторвавшиеся} \\ \text{заразились} \\ 10 \end{array} \right] \cdot K = \begin{array}{c} \text{выявлено} \\ 211 \end{array}$$

$$K = \frac{220}{X + 220} \left[ X - \frac{2}{3} X + 30 + \frac{1}{2} X + 203 + 10 \right] \cdot \frac{220}{X + 220} = 211 \quad X = 254 \quad K = 0,46$$

Рис. 2. Расчет количества невыявленных бациллярных больных в 2005 году

Пример расчета числа невыявленных больных в 2005 году представлен на схеме (рис. 2). Примем за X количество неизвестных больных текущего года. Тогда формирование бациллярных больных следующего года будет осуществляться за счет суммирования следующих групп: невыявленные бациллярные больные предыдущего года ( $1/3X$ ); заразившиеся от впервые выявленных бациллярных больных; заразившиеся от невыявленных бациллярных больных предыдущего года ( $1/2X$ ); заразившиеся от «хроников»; заразившиеся от «оторвавшихся от лечения». Зная количество впервые выявленных больных следующего года, можно рассчитать количество неизвестных больных и коэффициент выявления.

Таким образом, при величине коэффициента выявления ( $K_{\text{ср}} = 0,45$ ) (то есть при выявлении менее  $1/2$  из находящихся на территории региона бациллярных больных) расчетные данные, полученные на основании разработанной математической модели, и статистические данные совпадают (рис. 3).

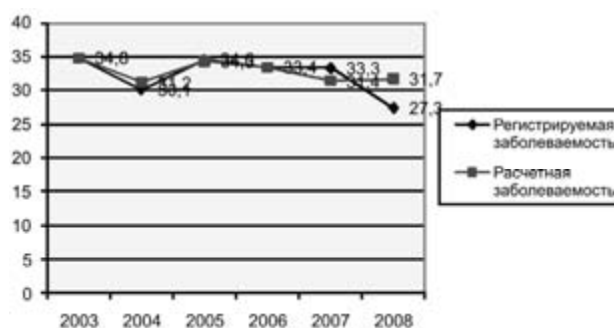


Рис. 3. Регистрируемая и расчетная заболеваемость с МБТ (+) на 100 тыс. населения при выявлении 45 % бациллярных больных на территории Карелии, 2003–2008 годы

Наши данные совпадают с результатами исследования, полученными в работе [6]. Анализ математической модели показал, что определяющую роль в увеличении «бациллярного ядра» и возникновении новых случаев бациллярного ТБ играют контингенты-бактериовыделители, формирующиеся в результате неэффективного лечения бациллярных форм ТБ. Как следует из созданной

математической модели, снижение показателя абациллирования впервые выявленных бациллярных больных в течение последних 3 лет (2005 год – 51,6 %, 2006-й – 55,4 %, 2007-й – 58,3 %) в среднем до 55 % приведет в ближайшие годы к значительному ухудшению эпидемиологической ситуации: к увеличению контингентов-бактериовыделителей («хроников»), выделяющих, как правило, лекарственно-устойчивые штаммы МБТ, а также к замедлению регрессии количества как впервые выявленных, так и невыявленных бациллярных больных.

С учетом рекомендаций ВОЗ (стратегия DOTS) о необходимости достижения показателя абациллирования в 85 % и выявления не менее 70 % бациллярных больных ввод данных коэффициентов в полученную математическую модель показывает, что достижение этих индикаторов позволяет добиться наибольшей регрессии количества бациллярных больных на территории региона (рис. 4).

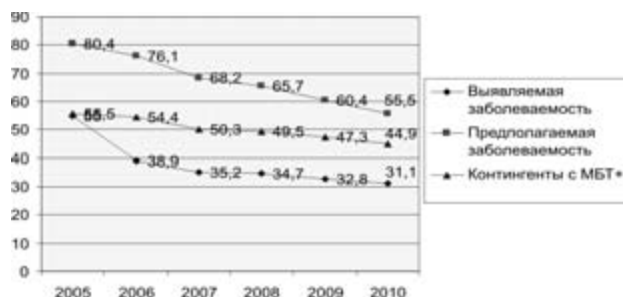


Рис. 4. Динамика заболеваемости с МБТ (+) на 100 тыс. населения при введении индикаторов ВОЗ (выявление – 70 %; абациллирование – 85 %) в математическую модель

Это также приведет к снижению летальности впервые выявленных больных, поскольку основной причиной летальности данной категории является позднее выявление запущенных, деструктивных форм ТБ, а также к сокращению числа

контингентов-бактериовыделителей. Таким образом, полученная математическая модель совпадает с известной эпидемиологической моделью распространения туберкулезной инфекции в обществе, данными, полученными в [6], [8], и подтверждает, что общая лечебная сеть выявляет менее 1/2 от имеющегося количества бациллярных больных на территории региона.

## ВЫВОДЫ

1. Созданная математическая модель позволяет прогнозировать эпидемиологическую ситуацию по туберкулезу в зависимости от абациллирования и летальности впервые выявленных больных и контингентов, отрывов от лечения и эффективности лечения больных с множественной лекарственной устойчивостью.
2. Результаты, полученные с использованием математической модели распространения бациллярного туберкулеза, совпадают с известной эпидемиологической моделью и подтверждают, что общая медицинская сеть выявляет всего лишь около 45 % находящихся на территории Карелии бациллярных больных.
3. Снижение показателя абациллирования впервые выявленных больных в течение последних 3 лет в среднем до 55 % может привести на территории Карелии к ухудшению эпидемической ситуации – к увеличению контингентов-бактериовыделителей («хроников»), что неизбежно приведет к увеличению бациллярных больных в регионе и росту первичной лекарственной устойчивости.

Использование полученной математической модели подтверждает положение стратегии DOTS о том, что регрессию «бациллярного ядра», а также снижение летальности можно получить при выявлении не менее 70 % бациллярных больных и абациллирования не менее 85 % выявленных больных.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гурский Д. А., Турбина Е. С. Вычисления в Mathcad 12. СПб.: Питер, 2006. 544 с.
2. Капков Л. П. Значение показателей резервуара бациллярных больных туберкулезом органов дыхания в оценке эпидемической ситуации по туберкулезу // Проблемы туберкулеза и болезней легких. 2007. № 1. С. 17–22.
3. Перельман М. З., Корякин В. А. Фтизиатрия: Учебник. М.: Медицина, 2004. 520 с.
4. Туберкулез в Российской Федерации в 2006 г.: Аналитический обзор основных статистических показателей по туберкулезу, используемых в Российской Федерации. М.: Триада, 2007. 126 с.
5. Хрулева Т. С. Резервуар туберкулезной инфекции в Российской Федерации и возможности его ограничения: Дис. ... д-ра мед. наук. М., 2001. 291 с.
6. Dye Ch., Scheele S., Dolin P., Pathania V. et al. Global Burden of Tuberculosis / Estimated Incidence, Prevalence, and Mortality by Country // JAMA. August 18, 1999. Vol. 282. № 7-677-686.
7. Global tuberculosis control: surveillance, planning, financing. [Электронный ресурс]. Режим доступа: [http://www.who.int/tb/publications/global\\_report/2007/download\\_centre/en/index.htm](http://www.who.int/tb/publications/global_report/2007/download_centre/en/index.htm).
8. Styblo K., Sutherland I. Epidemiological incidents for planning surveillance and evaluation of tuberculosis programmes // Bull. Int. Tuberc. 1974. Vol. 34. P. 49.
9. Treatment of Tuberculosis: Guidelines for National Programmes. 2-nd. ed. Geneva, 1997. 222 p.

УДК 553.43+553.431 (470.22)

**ЛЮДМИЛА ВЛАДИМИРОВНА КУЛЕШЕВИЧ**

кандидат геолого-минералогических наук, ведущий научный сотрудник Института геологии, Карельский научный центр РАН, доцент кафедры геологии и геофизики горно-геологического факультета, Петрозаводский государственный университет

*kuleshev@krc.karelia.ru*

**ОЛЕГ БОРИСОВИЧ ЛАВРОВ**

научный сотрудник Института геологии, Карельский научный центр РАН

*petrlavrov@list.ru*

**САМОРОДНАЯ МЕДЬ, ЗОЛОТО И МЕДНЫЕ ПРОМЫСЛЫ В КАРЕЛИИ**

В статье рассматривается история обнаружения и разработки месторождений меди и золота на территории Карелии. Дается описание медных руд и приводится состав самородной меди и золота.

Ключевые слова: самородные медь и золото, сульфиды меди, медные промыслы Карелии, Петровские заводы

Археологические находки меди на карельской земле свидетельствуют, что ее добыча началась еще во II веке до н. э. В Карелии наиболее известным объектом, где были обнаружены первые проявления меди, следы древних разработок и простейшие медные изделия, является место Пегрема в Заонежье [1], [6]. Медь добывали простым способом – небольшие самородки выбивали из породы. Затем их отбивали и из них изготавливали простейшие орудия труда – ножики, скребки, а также крючки, украшения, кольца. С XVII века началась разработка сульфидных медных руд. Выплавку меди производили на первых заводах, которые начали действовать приблизительно в то же время. Изделия и иконы, изготовленные из местной меди, иногда находят на раскопках старых монастырей, поселений и заводов.

**САМОРОДНАЯ МЕДЬ**

Находки наиболее крупных самородков были сделаны в основном вблизи г. Кондопоги в Заонежье на проявлении Береговом при горно-геологических работах и частными лицами.

Здесь Онежская структура сложена преимущественно основными вулканическими и осадочными палеопротерозойскими отложениями – толщами людиковийского надгоризонта (по региональной стратиграфической шкале), имеющими возраст ~1,97 млрд лет и прорванными силлами габбро-диабазов. Самородки меди были приурочены преимущественно к метабаазальтам или габбро. На проявлении Береговом дендритовидные сращения меди были обнаружены в двух зонах брекчированных и измененных основных пород (восточной и западной) длиной около 100 м и мощностью от 0,1–0,5 до 2,5 м, имеющих падение под углом 65–70 °С. В восточной зоне жильные минералы представлены серым сливным кварцем, эпидотом, в зальбандах жил встречаются также актинолит, хлорит и турмалин. Рудные минералы в измененных метабазах составляют 1 %: это пирит, халькопирит, магнетит, гематит. Кроме того, из протоочной пробы весом 40 кг, отобранной из этой же зоны, были выделены 22 золотины и их сростки размером 0,1–0,3 мм (при среднем содержании Au 0,1–0,2 г/т, по данным КарГЭ). Самородная медь в этой зоне встречается редко в секущих нало-

женных прожилках кварца 2-й генерации, имеющих мощность 1–12 см. Западная зона, в отличие от восточной, представляет линзующуюся полосу брекчированных метабазальтов, сцементированных кварцем, эпидотом, хлоритом, карбонатом, иногда с адуляром и баритом, и содержит самородную медь. Поздние пустоты в измененных базитах, как отмечают исследователи, бывают даже выполнены почками цеолитов и карбонатов. Самородная медь в западной зоне представлена очень широко: она образует дендриты, сростания, напоминающие корки и шлак. Вес самородков достигал 0,5–10 кг. Кроме меди в жилах встречаются халькозин, гематит, куприт, что подчеркивает образование меди в окисленных условиях.

Уникальные самородки, найденные в Заонежье, весом более 100 кг и длиной до 1 м хранятся в разных музеях, в том числе в Петрозаводске: в Музее Института геологии (рис. 1) и археологии КарНЦ РАН и Карельском краеведческом музее. Ветвистое строение этих уникальных природных образований напоминает растения или кораллы, поэтому их называют дендритами. В них иногда сохраняются оставшиеся реликты обломков пород, силикаты и кварц. Дендриты с поверхности бывают окислены, покрыты коричнево-бурым и зеленым порошковым налетом. Состав самородков изучался с использованием микросондового анализатора. Установлено, что медь всех исследованных крупных образцов имеет практически чистый состав (рис. 2). В поверхностном слое обнаружены куприт ( $\text{CuO}$ ), хлорид ( $\text{CuCl}_2$ ) и карбонат меди (малахит), образующие тонкую кайму или налет. Одновременно с исследованиями музейных экспонатов самородной меди, в которых принимал участие студент кафедры геологии и геофизики ПетрГУ А. Вихко, были изучены образцы с месторождения Береговое (обр. Бер-1, Бер-2), где медь находилась в сростании с другими минералами (рис. 2). Подобные находки и сейчас можно сделать в заброшенных или разрабатываемых карьерах габбро-диабазов в Кондопожском районе. В исследованных образцах медь представлена «проволочками» и дендритами размером от 2–5 мм до 2 см. Она образует сростания с кварцем, реже с кальцитом в сильно эпидотизированных метабазальтах. Изучение образца показало, что здесь медь также имеет практически чистый состав и на 96–100 % состоит из Cu. На ее поверхности также установлены оксид ( $\text{CuO}$ ) и хлорид меди ( $\text{CuCl}_2$ ). Нерудный парагенезис жил представлен кварцем, эпидотом, розетками темно-зеленого хлорита. Хлорит содержит:  $\text{SiO}_2$  – 30,3–31,16 %,  $\text{Al}_2\text{O}_3$  – 17,67–21,44 %,  $\text{FeO}$  – 37,57–41,85 %,  $\text{MgO}$  – 8,77–9,46 %,  $\text{MnO}$  – до 0,53 % (средняя расчетная  $T_{\text{обр.}}$  = 260 °C). Этот высокожелезистый хлорит часто содержит вросстки тонких чешуек гематита, появляющиеся в участках его замещения тонкими пластинками слюды. В кварцевых гнездах обнаружены единичные зерна серебра и редких Ce-La-минералов.

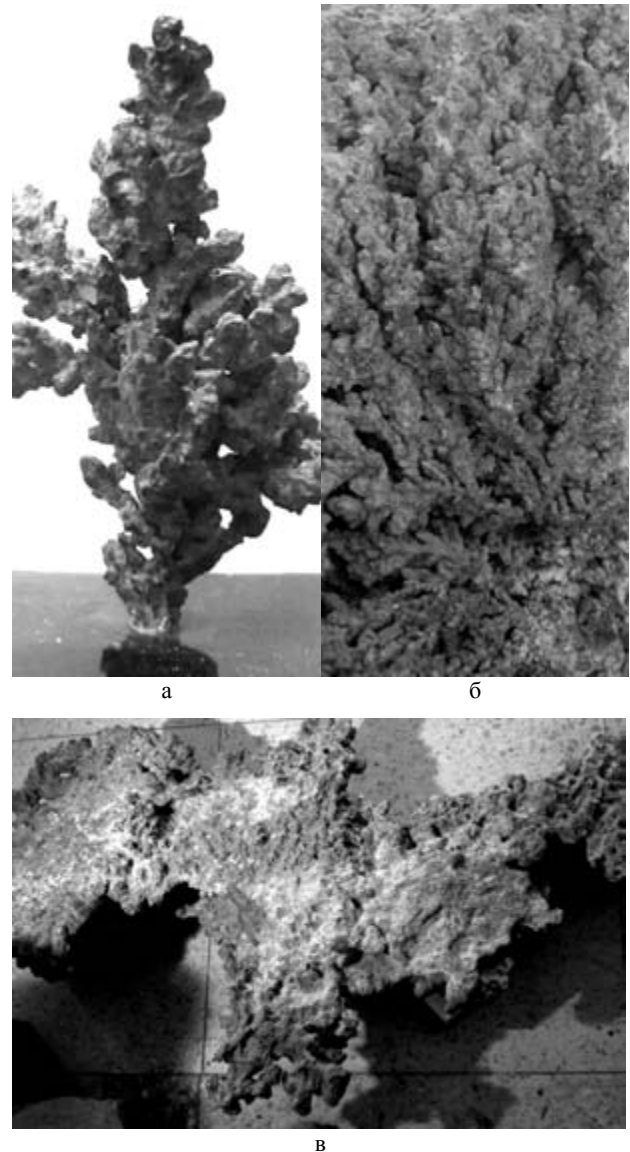


Рис. 1. Самородки меди дендритового строения, найденные в Карелии: а – размер 7 см; б – деталь дендритового строения; в – длина около 1 м

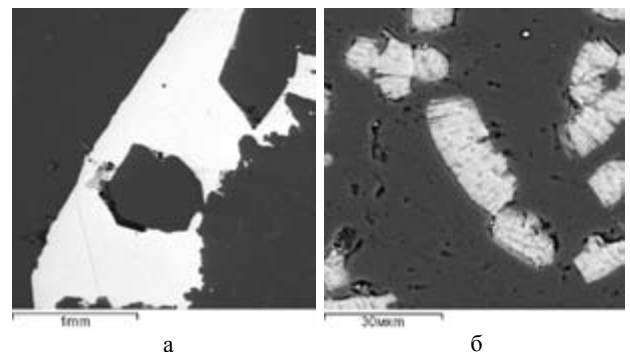


Рис. 2. Самородная медь и ее природные ассоциации (месторождение Береговое, Карелия): а – медь (белая), кварц (черный) в ансифе (Бер-1); б – хлорит радиально-лучистый (светло-серый) в кварце (черный)

Таким образом, установлено, что крупные самородки (дендриты и «проволочки») меди приурочены к зонам низкотемпературного жильного гидротермального изменения, представленного эпидотом, кальцитом, хлоритом, кварцем. Самородки меди являются уникальным коллекционным минералогическим материалом.

### СУЛЬФИДНЫЕ МЕДНЫЕ РУДЫ

В Средние века медь уже умели выплавлять из сульфидных руд, содержащих халькопирит, борнит, халькозин, в простейших печах, поэтому работы карельских рудознатцев были направлены на их поиски. В XVII веке в Заонежье в районе пос. Толвуя Толвуйской волости были открыты сульфидные медные руды, которые начали интенсивно использоваться. В 1672 году там же был построен первый Фоймогубский завод по выплавке руд. Руды доставлялись из близлежащих рудников, но, так как их запасы были небольшие, завод со временем перешел на выплавку железа, осуществлявшуюся из озерных и болотных руд. Как отмечают исследователи истории горного дела в Карелии, в период развития Российского государства разработка небольших месторождений, расположенных в непосредственной близости от Санкт-Петербурга, имела большое значение, так как в это время создавалось вооружение армии. Первые Петровские заводы, заложенные в Карелии как железоделательные, периодически занимались выплавкой меди. После окончания Северной войны в Российском государстве вновь стал остро ощущаться дефицит меди, что стимулировало новые ее поиски. В начале XVIII века в Олонецком крае были открыты еще несколько новых месторождений медных руд и заложены рудники Воронов Бор, Пялозерский, Мунозерский, Каличьеостровский, Ондозерский [2]. Как медеплавильные в это время работали Кончезерский и Петровский заводы. В XVIII–XIX веках в Карелии действовало около 200 медных рудников, при этом размер залежей не играл решающей роли, отрабатывались доступные и наиболее богатые жилы. Наиболее известными разрабатываемыми объектами среди них были Воицкий и Вороновоборский рудники, входившие в так называемую группу Олонецких горных заводов.

Рудник Воицкий был заложен на северном берегу Выгозера на Воицком полуострове. Здесь в 1742 году были обнаружены богатые жилы с сульфидами меди. В старых описаниях приводятся план рудника и схема расположения главной разрабатываемой жилы [5]. Рудник действовал более 40 лет. Из него вручную с 1742 по 1791 год было добыто 106 т меди и 74 кг золота при содержаниях Cu 1,28 % (до 14 %) и Au 9,1 г/т [4]. Добывались преимущественно халькопиритовые и борнит-кварцевые руды. Золото было обнаружено в самородной форме в кварцевой жиле (рис. 3), извлеченный металл поступал в государственную казну.

Рудник посещали известные геологи и академики РАН – А. Г. Лаксман, Н. Я. Озерцовский, путешественник П. И. Челищев. Поэт Г. Р. Державин, будучи губернатором Олонецкой губернии, в 1783 году также удостоил своим посещением эту горную разработку. При строительстве Беломорско-Балтийского канала часть выработок и жилы были затоплены. Вблизи рудника сейчас поставлен памятный знак горно-рудным разработкам XVIII века.

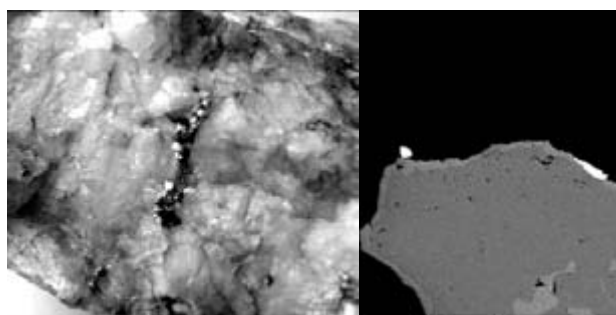
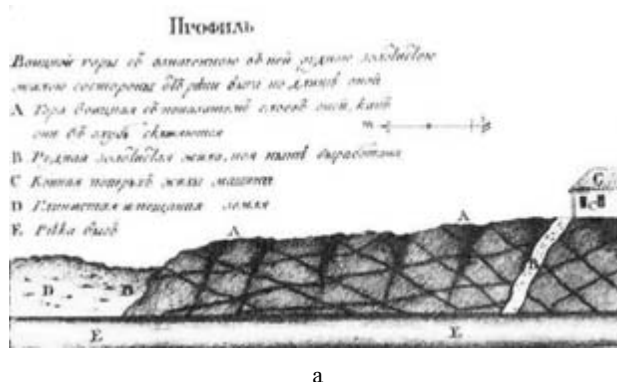


Рис. 3. Самородное золото Воицкого рудника: а – золото в кварце (размер – 5 мм); б – микрофотография: борнит, халькозин (серое), золото (белое, размер – 10–20  $\mu\text{m}$ )



а



б

Рис. 4. Воицкий медный рудник – производственный памятник XVIII века: а – схема залегания главной жилы [5]; б – памятный знак, установленный в д. Воицкое



*Вороноборский рудник* начал действовать с конца XVIII века и работал 8 лет. В начале XX века на его месте заложили карьер. Извлеченные руды были представлены халькопиритовыми, борнитовыми и промежуточными минеральными типами в кварцевых гравелитах. В окисленных рудах присутствуют халькозин, ковеллин, гематит и порошковые налеты зеленых и синих карбонатов меди (малахита и азурита). Содержание Cu в рудах составляет 0,5–14 %, в среднем 1,3 % [4]. Часть руды была вывезена и переплавлена, часть складирована в штабеля, до сих пор находящиеся на месторождении.

Современная оценка сульфидных медных проявлений Карелии проводилась нами в связи с обнаружением в этих рудах золота [3]. На участке месторождения Воронов Бор из коренных обнажений и отвалов были отобраны пробы, изучен минеральный состав руд и проанализировано со-

держание Au (2,4–3,7 г/т). Эти исследования позволили установить, что мелкое и тонко-дисперсное (размером 0,5–30 мкм) золото представлено Ag-золотом, электрумом и кюстелитом (Ag 16–74 %) и встречается в борнитовых рудах. Мелкие сростания встречаются и в кварцевых жилах на южном фланге месторождения. К халькопирит-борнитовым рудам тяготеет также молибденитовая минерализация. Наиболее поздние минералы серебра установлены в сростании с баритом, секущим куприт. В пустотках отмечены и мелкие редкие выделения самородной меди.

Небольшие палеопротерозойские месторождения и проявления меди в Карелии сейчас не имеют промышленного значения. Многие из этих небольших рудных объектов, выходящих на поверхность, были отработаны в XVIII веке. Интерес к ним в последнее время проявился только в связи с находками Au, Ag и других более редких металлов.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Журавлев А. П. Кузнецы древней Пегремы. Петрозаводск: РИО Роскомиздата, 1993. 31 с.
2. Кузин А. А. История открытий рудных месторождений в России до середины XIX в. М.: Изд-во АН СССР, 1961. 360 с.
3. Кулешевич Л. В., Лавров О. Б., Голубев А. И. Золотосодержащее медносульфидное месторождение Воронов Бор и перспективы медносульфидных проявлений Карелии // Геология и полезные ископаемые Карелии. Петрозаводск: Изд-во КарНЦ РАН, 2009. Вып. 12. С. 26–47.
4. Минерально-сырьевая база Республики Карелия. Кн. 1. Петрозаводск: Карелия, 2005. 278 с.
5. Озерцовский Н. Я. Путешествия по озерам Ладожскому и Онежскому. Петрозаводск: Карелия, 1989. 208 с.
6. Тимофеев В. М. Месторождения медных руд Заонежья // Известия Ленинградского геолого-гидрогеофизического треста. 1934. 14 с.

УДК 575.22.582.475.2

**АЛЕКСЕЙ АЛЕКСЕЕВИЧ ИЛЬИНОВ**

кандидат сельскохозяйственных наук, научный сотрудник  
Института леса, Карельский научный центр РАН  
*ialexa33@yandex.ru*

**ДМИТРИЙ ВЛАДИСЛАВОВИЧ ПОЛИТОВ**

доктор биологических наук, заведующий лабораторией  
популяционной генетики, Институт общей генетики  
им. Н. И. Вавилова РАН (г. Москва)  
*dvp@vigg.ru*

**БОРИС ВЛАДИМИРОВИЧ РАЕВСКИЙ**

кандидат сельскохозяйственных наук, старший научный со-  
трудник Института леса, Карельский научный центр РАН  
*raevski@drevlanka.ru*

**ВЛИЯНИЕ СПОСОБОВ ЛЕСОВОЗОБНОВЛЕНИЯ НА ГЕНЕТИЧЕСКУЮ СТРУКТУРУ ПОПУЛЯЦИЙ  
ЕЛИ ФИНСКОЙ *PICEA x FENNICA* (REGEL) KOM.**

С помощью метода электрофоретического анализа изоферментов изучено влияние способов лесовозобновления на генетическую структуру древостоев ели финской *Picea x fennica* (Regel) Kom. Не обнаружено статистически значимых различий в уровне генетического разнообразия между коренным ельником, производным древостоем, сформировавшимся из сохранившегося после рубки подроста, и лесными культурами, созданными методом посева. В целом уровень генетического разнообразия исследованных древостоев оказался довольно высоким и был близок к значениям, полученным для большинства хвойных, в частности видов рода *Picea*.

Ключевые слова: лесные культуры, коренной древостой, производный древостой, формовое разнообразие, изоферменты, генетическая структура, генетическое разнообразие

Для поддержания устойчивости популяций лесных древесных видов решающее значение имеет сохранение оптимального уровня внутривидового генетического разнообразия, и это должно учитываться при проведении различных лесохозяйственных мероприятий [1]. В то же время многие вопросы влияния хозяйственной деятельности на уровень генетического разнообразия популяций древесных видов остаются еще слабо изученными.

Целью исследования явилась сравнительная оценка фенотипической и генетической структуры малонарушенных и подвергшихся антропогенному воздействию популяций ели финской *Picea x fennica* (Regel) Kom.

**ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ**

Объектами исследования служили еловые древостои среднетаежной подзоны, представлен-

ные главным образом елью гибридной или финской *Picea x fennica* (Regel) Kom., интрогрессивным гибридом ели европейской *Picea abies* (L.) Karst. и ели сибирской *Picea obovata* Ledeb. В Кондопожском и Пудожском районах Карелии были заложены 3 пробные площади (ПП). Первая, ПП-1 (Шуйско-Виданский лесхоз, Речинское лесничество, вблизи Галлезеро), размером 0,11 га – в лесных культурах ели, созданных посевом в 1966 году. Почва – супесчаный сильнокаменистый бурозем. Вторая, ПП-2 (Кондопожский лесхоз, Кончезерское лесничество, п. Кончезеро), 0,25 га, заложена в производном ельнике, сформировавшемся преимущественно из сохранившегося после рубки подроста. Давность рубки – 50–55 лет. Участок характеризуется аналогичными с первой ПП почвами. Тип леса в обоих случаях – ельник черничный. Третья, ПП-3, 0,49 га, заложена в коренном ельнике черничном свежем, произрастающем на территории НП «Водлозер-

ский» (Водлозерское лесничество). Данная ПП была заложена в 1999 году В. А. Ананьевым и Б. В. Раевским в качестве элемента сети лесного мониторинга в НП «Водлозерский». В настоящей работе она служила эталоном малонарушенной климаксовой ценопопуляции ели европейской. Почва подзолисто-оглеенная, выложена тяжелыми глинами, очень влажная. Древостой по структуре близок к абсолютно разновозрастному. Пробные площади закладывались в соответствии с ОСТ 56-69-83 [3].

Для оценки уровня фенотипического разнообразия использовали анализ формового состава популяций по габитуальным признакам ели – типу ветвления и структуре коры [6]. В исследуемых древостоях были отобраны модельные деревья в количестве 41, 41 и 30 в лесных культурах, производном и коренном древостоях соответственно. Для анализа генетической структуры с каждого модельного дерева со средней и верхней третей кроны со стороны, ориентированной на юг, секатором отбирали побеги текущего года с почками (20–40 штук с дерева). Статистическая обработка материала проводилась с использованием MS Excel 2003. Основные показатели генетической изменчивости определяли с помощью программы GenAlEx 6.2 [18].

Изучение генетической структуры популяций ели финской проводили на базе лаборатории популяционной генетики Института общей генетики им. Н. И. Вавилова РАН (г. Москва) с помощью метода электрофоретического анализа изоферментов вегетативных почек ели в полиакриламидном геле по разработанной ранее методике [4]. Изученные ферментные системы, их сокращенное обозначение, буферные системы и зоны активности приведены в табл. 1.

## РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

*Фенотипическое разнообразие коренных и производных древостоев и лесных культур.* Основные таксационные характеристики пробных площадей даны в табл. 2. Исследованные пробы характеризуются примерно одинаковыми условиями произрастания (один тип леса – ельник-черничник). Густота насаждений (число стволов на гектар) увеличивается от коренного ельника к лесным культурам, соответственно этому увеличивается и полнота насаждения. Усложнение возрастной структуры идет в обратном направлении (рис. 1) – от лесных культур (однообразные деревья) к коренному ельнику (абсолютно разновозрастный древостой).

Таблица 1

Изученные ферментные системы ели финской

Фермент	Сокращенное обозначение	Номер по К. Ф.	Буферная система	Число зон активности	
				наблюдаемых	интерпретируемых
Флуоресцентная эстераза	FE	3.1.1.1	В, С	2	1
Форматдегидрогеназа	FDH	1.2.1.2	С	1	1
Глутаматдегидрогеназа	GDH	1.4.1.2	В, С	1	1
Глутаматоксалоацетаттрансаминаза	GOT	2.6.1.1	С	3	3
Изоцитратдегидрогеназа	IDH	1.1.1.42	А	2	2
Лейцинаминопептидаза	LAP	3.4.11.1	С, В	2	2
Малатдегидрогеназа	MDH	1.1.1.37	А	3	3
Фосфоенолпируваткарбоксилаза	PEPCK	4.1.1.31	А	1	1
6-фосфоглюконатдегидрогеназа	PGD	1.1.1.44	А	3	2
Фосфоглюкоизомераза	PGI	5.3.1.9	С	2	2
Фосфоглюкомутаза	PGM	2.7.5.1	В, А	2	2
Шикиматдегидрогеназа	SKDH	1.1.1.25	А	2	2
Супероксиддисмутаза	SOD	1.15.1.1	В	3	1

Примечание. Буферные системы: А – морфолин-цитратная, pH 7,8 [9]; В – трис-ЭДТА-боратная, pH 8,6 [15]; С – трис-цитрат-LiOH-боратная [19].

Таблица 2

Таксационные характеристики нативной и нарушенной популяций и лесных культур ели финской

№ п/п	Древостой	Тип леса	Структура древостоя	Бонитет	Диаметр средний, см	Высота средняя, м	Число стволов, шт./га	Запас, м <sup>3</sup> /га	Относительная полнота
1	ПП-1, лесные культуры	черничный	10Е40	IV	8,5	9,2	3771	142,06	0,85
2	ПП-2, производный ельник	черничный	5Е1404Е100 1Ос+Б, С	IV	18,0	17,2	868	226,28	0,85
3	ПП-3, коренной ельник	черничный	4,6Е2402,3Е1901,1Е120 1С1Ос+Б	IV	27,0	21,0	660	242,5	0,76

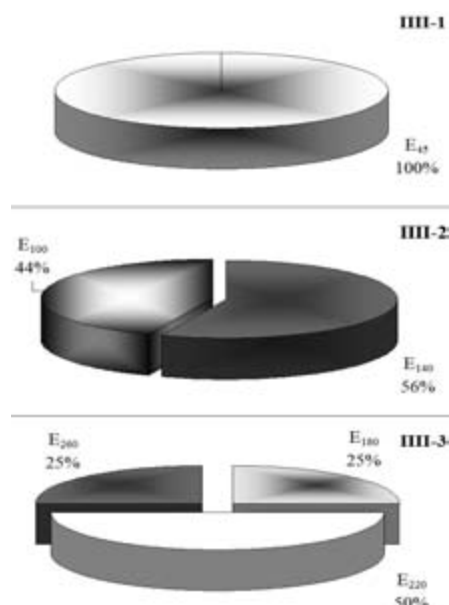


Рис. 1. Возрастная структура древостоев по основной породе – ели (E): в подстрочнике показан возраст группы растений

Результаты изучения формового состава и структуры насаждений по строению коры представлены на рис. 2. Анализ формовой структуры производного древостоя и культур выявил у них однообразие по типу строения коры – практически все деревья были представлены чешуйчатокорой формой. Данные о формовом составе коренного ельника, взятые из более ранней работы [7], показали, что здесь представлены все три формы, причем также доминируют чешуйчатокорые деревья (75 %). Трещиноватокорые деревья составляют около 24 %, а гладкокорые встречаются единично (0,6 %). С помощью дисперсионного анализа (ANOVA) была показана статистически значимая связь между типом коры и возрастом дерева – трещиноватокорые ели выявлены главным образом среди старших по возрасту деревьев [7]. В коренном ельнике возраст деревьев варьирует от 23 до 308 лет. По-видимому, этим и объясняется его более сложный формовый состав.

Вследствие значительной сопряженности изменчивости по типу коры с возрастом дерева данный признак используется главным образом для глазомерной оценки возрастной структуры древостоя.

Оценка фенотипического разнообразия по типу ветвления показала (рис. 3), что культуры отличаются наименьшим разнообразием: подавляющее большинство деревьев были плосковетвистыми, щетковидные составили всего 6 %. Скорее всего, это связано с высокой густотой данного насаждения (табл. 2) и молодостью деревьев. В производном ельнике, так же как и в коренном, обнаружены 4 основных типа ветвления – плоский, щетковидный, компактный и гребенчатый. Отличия заключаются в процентном соотношении этих форм – 29 %, 67 %, 1 % и 3 % в производном ельнике; 58 %, 20 %, 21 % и 1 % – в коренном.

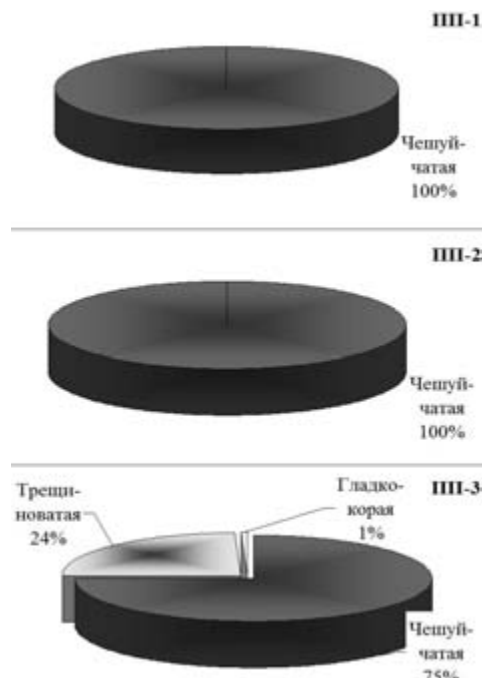


Рис. 2. Формовый состав лесных культур (ПП1), производного (ПП2) и коренного (ПП3) древостоев по строению коры

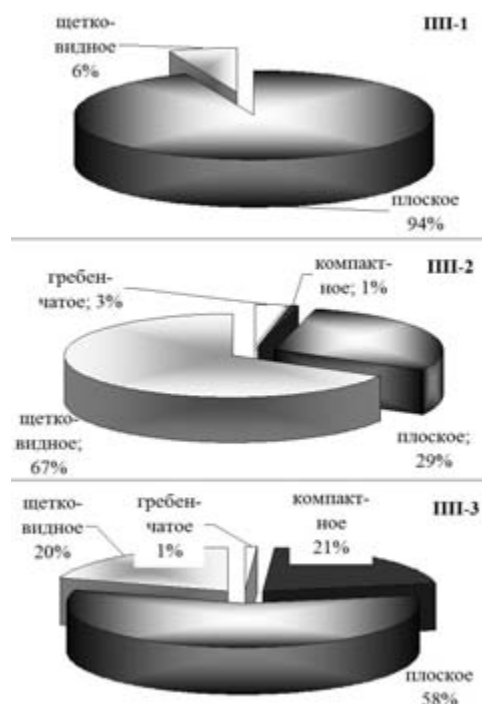


Рис. 3. Формовый состав лесных культур (ПП1), производного (ПП2) и коренного (ПП3) древостоев по типу ветвления

Таким образом, результаты анализа формового состава коренного и производного древостоев и лесных культур по типу ветвления свидетельствуют о разном уровне фенотипической изменчивости в исследованных популяциях ели финской. Более бедный формовой состав лесных культур говорит о невысокой степени фенотипического разнообразия в них по сравнению с нативной и нарушенной популяциями ели финской.

*Генетическая структура и уровень генетического разнообразия коренных и производных*

*древостоев и лесных культур.* С помощью электрофоретического анализа изоферментов вегетативных почек изучена генетическая структура коренного и производного древостоев и культур. Изоферментный анализ 13 ген-ферментных систем выявил 53 аллельных варианта 24 локусов в выборке ели из коренного древостоя, 51 – в культурах ели и 47 – в производном древостое (табл. 3). Мономорфными во всех популяциях оказались 5 локусов (Got-2, Idh-2, Mdh-1, Pgi-1 и Sod-1), остальные – полиморфные.

Таблица 3

Аллельная структура нативной и нарушенной популяции  
и лесных культур ели финской

Локус	Аллель	Лесные культуры	Производный древостой	Коренной древостой	Локус	Аллель	Лесные культуры	Производный древостой	Коренной древостой
Fdh	n	82	82	60	Mdh-3	n	82	82	60
	B	0,793	0,695	0,717		B	0,000	0,012	0,000
	C	0,207	0,305	0,283		C	1,000	0,988	1,000
Fe	n	82	82	60	Pepca	N	82	82	60
	A	0,000	0,024	0,000		A	0,073	0,061	0,050
	B	1,000	0,963	1,000		B	0,927	0,939	0,950
Gdh	C	0,000	0,012	0,000	6-Pgd-2	N	82	82	60
	n	82	82	60		D	0,538	0,512	0,600
	A	0,622	0,610	0,517		F	0,462	0,488	0,400
Got-1	B	0,378	0,390	0,483	6-Pgd-3	N	82	82	60
	n	82	82	60		B	0,641	0,775	0,850
	A	0,000	0,000	0,017		E	0,359	0,225	0,150
Got-2	B	1,000	1,000	0,983	Pgi-1	N	82	82	60
	n	82	82	60		B	1,000	1,000	1,000
	B	1,000	1,000	1,000		Pgi-2	N	82	60
Got-3	n	82	82	60	Pgm-1	B	0,232	0,256	0,200
	A	0,451	0,366	0,433		D	0,756	0,732	0,800
	C	0,537	0,634	0,567		F	0,012	0,012	0,000
Idh-1	E	0,012	0,000	0,000	Pgm-2	N	82	82	60
	n	82	82	60		B	1,000	1,000	0,950
	B	0,085	0,037	0,033		C	0,000	0,000	0,050
Idh-2	C	0,915	0,963	0,967	A	N	82	82	60
	n	82	82	60		A	0,049	0,073	0,033
	B	1,000	1,000	1,000		B	0,732	0,622	0,817
Lap-1	C	0,000	0,000	0,017	Skdh-1	C	0,220	0,305	0,150
	D	0,195	0,183	0,190		N	82	82	60
	E	0,780	0,817	0,776		A	0,037	0,000	0,000
Lap-2	F	0,024	0,000	0,017	Sod-1	B	0,012	0,000	0,000
	n	82	82	58		C	0,902	0,878	0,933
	B	0,134	0,110	0,086		F	0,049	0,122	0,067
Mdh-1	C	0,195	0,159	0,276	Skdh-2	N	82	82	60
	D	0,622	0,659	0,586		C	0,976	0,988	1,000
	E	0,049	0,073	0,052		D	0,024	0,012	0,000
Mdh-2	Sod-1	82	82	60	Sod-2	N	82	82	60
	n	82	82	60		A	1,000	1,000	1,000
	B	1,000	1,000	1,000		N	82	82	60
	A	0,024	0,049	0,100		A	0,024	0,049	0,100
	C	1,000	1,000	0,983		B	0,963	0,951	0,900
	D	0,000	0,000	0,017		C	0,012	0,000	0,000

Примечание. n – число исследованных гаплотипов.

Таблица 4

Генетическая изменчивость ели финской по 24 изоферментным локусам  
в коренном и производном древостое и лесных культурах

Выборка	N	a	a<5%	a <sub>y</sub>	A	ne	P <sub>99%</sub> , %	P <sub>95%</sub> , %	H <sub>e</sub>	H <sub>o</sub>	F
ПП-1, лесные культуры	29	53	9	8	1,96 ± 0,20	1,35 ± 0,08	60,00	52,00	0,199 ± 0,042	0,213	-0,070
ПП-2, производный ельник	41	47	6	—	1,80 ± 0,15	1,35 ± 0,08	64,00	52,00	0,197 ± 0,042	0,188	0,046
ПП-3, коренной ельник	41	51	13	5	2,12 ± 0,19	1,35 ± 0,08	80,00	56,00	0,202 ± 0,039	0,197	0,025
<i>Picea x fennica</i> [5]	175	—	—	—	1,96 ± 0,03	1,34	64,00	64,00	0,182 ± 0,006	0,192 ± 0,006	-0,055

Примечание. N – число изученных деревьев; a, a<5% и a<sub>y</sub> – количество выявленных в популяции аллелей – всех, с частотой встречаемости менее 5 % и уникальных соответственно; A – число аллелей на локус; P<sub>99%</sub> и P<sub>95%</sub> – полиморфность по 99 % и 95 % критерию соответственно; H<sub>e</sub> и H<sub>o</sub> – гетерозиготность ожидаемая и наблюдаемая соответственно; F – коэффициент инбридинга (индекс фиксации Райта).

Для всех изученных локусов наиболее распространенные аллели (с частотой более 0,05) являются общими для всех выборок. Своеобразие выборок выявляется при рассмотрении редких (с частотой не более 0,05) аллелей. Лесные культуры характеризуются максимальным числом редких аллелей (25,5 % от общего числа), превзойдя по этому показателю даже коренной ельник (17,0 %). Другой показатель – количество уникальных, выявленных только в одной выборке аллелей. По нему на первом месте находится коренной ельник (8 аллелей), на втором – культуры (5 аллелей). В производном ельнике уникальных аллелей не обнаружено.

Результаты, характеризующие уровень генетической изменчивости в изученных популяциях ели финской, представлены в табл. 4. По такому основному параметру, как наблюдаемая гетерозиготность (H<sub>o</sub> = 0,213), выделилась выборка из лесных культур. Производное насаждение уступает культурам и коренному ельнику по уровню гетерозиготности и среднему числу аллелей на локус. При этом максимальные значения среднего числа аллелей на локус (A = 2,12), уровня полиморфизма (P<sub>99%</sub> = 80 %) и ожидаемой гетерозиготности (H<sub>e</sub> = 0,202) были выявлены в коренном древостое. Однако обнаруженные между популяциями различия в средних значениях параметров генетической изменчивости оказались статистически незначимы. В целом уровень генетического разнообразия исследованных выборок оказался довольно высоким и был близок к значениям, полученным другими исследователями для популяций большинства хвойных, в частности видов рода *Picea* [12].

Коэффициент фиксации Райта указывает на соотношение гомозиготных и гетерозиготных особей в популяциях [21]. В коренном и производном древостое выявлен небольшой избыток гомозигот (F = 0,046 и F = 0,025 соответственно), в то время как лесные культуры характеризовались избытком гетерозиготных особей (F = -0,070). Тем не менее значения этого параметра свидетельствуют о незначимом отклонении от равновесия Харди–Вайнберга в исследованных популяциях ели (табл. 4).

Проведенные исследования показали, что различия в генетической структуре между корен-

ным и производным ельниками и лесными культурами касались только встречаемости редких и уникальных аллелей. Не выявлено значимого влияния изученных способов лесовозобновления на уровень генетической изменчивости сформированных насаждений. Обнаруженный уровень внутривидового генетического разнообразия оказался довольно высоким как в коренном малонарушенном древостое, так и в производном насаждении и лесных культурах. В ряде работ, касающихся антропогенного влияния на генетическую структуру насаждений, также отмечено отсутствие заметного изменения уровня генетического разнообразия в нарушенных популяциях по сравнению с нативными [2], [13], [20]. В то же время S. E. Macdonald с соавторами обнаружили, что насаждения, возникшие после рубок, характеризовались значительно меньшим средним уровнем ожидаемой гетерозиготности по сравнению с естественными насаждениями [14].

Что касается лесных культур, одни авторы отмечают значительное снижение генетической изменчивости в искусственных древостоях [8], [10], [16] и др., другие указывают на отсутствие потерь в генетическом разнообразии при плантационном выращивании [11], [17], [22] и др. Одной из причин разногласий по этому вопросу могут быть различия в исследуемых объектах (например, условия и способы создания плантаций, наличие и виды ухода за ними и т. п.). В нашем случае выявленный для лесных культур высокий уровень генетической изменчивости является, по-видимому, следствием метода их создания – посева с использованием большого количества местных семян.

## ВЫВОДЫ

1. Лесные культуры уступают производному и коренному древостою в уровне фенотипического разнообразия, выявленного по типу ветвления, что можно объяснить молодостью культур и высокой густотой насаждения.
2. Для всех изученных локусов наиболее распространенные аллели (с частотой более 0,05) являются общими для всех выборок. Своеобразие выборок выявляется при рассмотрении редких и уникальных аллелей.

В то же время не обнаружено статистически значимых различий в уровне генетического разнообразия между коренным ельником, производным древостоем, сформировавшимся из подроста, и лесными культурами, созданными методом посева. В лесных культурах обнаружена тенденция к эксцессу, а в производном ельнике – к дефициту гетерозигот.

Наибольшим уровнем внутрипопуляционного генетического разнообразия характеризовался коренной древостой. Лесные культуры отличались более высоким уровнем генетического разнообразия по сравнению с производным древостоем. Причиной этого, по всей видимости, является метод их создания – посев, когда в формировании насаждения участвует большое количество деревьев (генотипов).

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ирошников А. И. Влияние концентрированных рубок на генофонд и продуктивность новых поколений лесовосстановителей // Проблемы развития лесного комплекса северо-западного региона. Петрозаводск, 1996. С. 25–27.
2. Камалова И. И. Генетические последствия влияния хозяйственной деятельности на популяционную структуру сосны обыкновенной в средней подзоне европейской тайги // Биологическое разнообразие лесных экосистем. М., 1995. С. 88–89.
3. ОСТ 56-69-83. Площади пробные лесоустroительные. Методы закладки. Порядок рассмотрения и утверждения возрасов рубок главного пользования лесом. Приказ Рослесхоза от 28.05.93 № 134.
4. Политов Д. В., Крутовский К. В. Клиальная изменчивость и интрогрессивная гибридизация в популяциях европейской и сибирской елей // Жизнь популяций в гетерогенной среде. Йошкар-Ола: Периодика Марий Эл, 1998. С. 78–89.
5. Потенко В. В., Ильинов А. А., Гончаренко Г. Г. Изучение генетической дифференциации популяций ели в Карелии с использованием метода изоферментного анализа // Селекция и семеноводство в Карелии. Петрозаводск: Карельский НЦ РАН, 1993. С. 66–76.
6. Правдин Л. Ф. Ель европейская и ель сибирская в СССР. М.: Наука, 1975. 180 с.
7. Раевский Б. В., Ананьев В. А., Ильинов А. А. Формовая структура популяций ели в коренных лесах средней подзоны тайги // Человек и окружающая среда Баренц-региона в начале XXI века: Материалы междунар. конф. Петрозаводск, 2001. С. 115–121.
8. Brown A. H. D. Enzyme polymorphism in plant populations // Theor. Popul. Boil. 1979. Vol. 15. P. 1–42.
9. Clayton J. W., Tretiak D. N. Amino-citrate buffer for pH control in starch gel electrophoresis // J. Fisheries Research Board Canada. 1972. Vol. 29. P. 1169–1172.
10. Conkle M. T. Isozyme variation and linkage in six conifer species // Proc. of Symp. on Isozymes of North Amer. For. Trees and For. Insects. USDA For. Serv. Gen. Tech. Rep. PSW-48. 1981. P. 11–17.
11. Eckert R. T., Joly R. J., Neale D. B. Genetics of isozyme variants and linkage relationships among allozyme loci in 35 eastern white pine clones // Canad. J. Forest Res. 1981. Vol. 11. № 3. P. 573–579.
12. Hamrick J. L., Godt M. J. W., Sherman-Broyles S. L. Factors influencing levels of genetic diversity in woody plant species // New Forest. 1992. Vol. 6. P. 95–12.
13. Knowles P. Comparison of isozyme variation among natural stands and populations: jack pine and black spruce // Canad. J. Forest Res. 1985. Vol. 15. № 5. P. 902–908.
14. Macdonald S. E., Thomas B. R., Cherniawsky D. M., Purdy B. G. Managing genetic resources of lodgepole pine in west-central Alberta: patterns of isozyme variation in natural populations and effects of forest management // Forest Ecology and Management. 2001. Vol. 152. P. 45–58.
15. Markert C. L., Faulhaber I. Lactate dehydrogenase isozyme patterns of fish // J. Exptl. Zool. 1965. Vol. 159. P. 319–324.
16. Moran G. F., Bell J. C., Matheson A. C. The genetic structure and levels of inbreeding in a *Pinus radiata* D. Don seed orchard // Silvae Genet. 1980. Vol. 29. № 1. P. 190–193.
17. Muona O., Harju O. Effective population size, genetic variability, and mating system in natural stands and seed orchards of *Pinus sylvestris* // Silvae Genet. 1989. Vol. 38. P. 221–228.
18. Peakall R. and Smouse P. E. GENALEX 6: genetic analysis in Excel. Population genetic software for teaching and research // Molecular Ecology Notes. 2006. Vol. 6. 288–295.
19. Ridgway S. H., Simpson, J. G., Patton G. S., Gilmartin W. G. Hematologic findings in certain small cetaceans // J. Am. Vet. Med. Assoc. 1970. Vol. 157. P. 566–575.
20. Thomas B. R., Macdonald S. E., Hicks M., Adams D. L., Hodgetts R. B. Effects of reforestation methods on genetic diversity of lodgepole pine: an assessment using microsatellite and randomly amplified polymorphic DNA markers // Theor. Appl. Genet. 1999. Vol. 98. P. 793–801.
21. Wright S. The genetical structure of populations // Ann. Eugenics. 1951. Vol. 15. P. 323–354.
22. Yow T. H., Wagner M. R., Wommack D. E., Tuskan G. A. Influence of selection for volume growth on the genetic variability of southwestern ponderosa pine // Silvae Genet. 1992. Vol. 41. P. 326–333.

УДК 630\*385.1+630\*547+630\*52

**ВАСИЛИЙ АЛЕКСЕЕВИЧ МАТЮШКИН**

младший научный сотрудник, главный инженер лесного хозяйства лаборатории лесоведения и лесоводства Института леса, Карельский научный центр РАН  
*matyush@krc.karelia.ru*

**СЕРГЕЙ АНАТОЛЬЕВИЧ МОШНИКОВ**

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

**ИВАН АНДРЕЕВИЧ БЕРДНИКОВ**

младший научный сотрудник лаборатории лесоведения и лесоводства Института леса, Карельский научный центр РАН  
*forest@krc.karelia.ru*

**ФОРМИРОВАНИЕ И ПРОДУКТИВНОСТЬ  
СОСНОВЫХ НАСАЖДЕНИЙ НА ОСУШЕННЫХ БОЛОТАХ**

Установлена динамика изменения густоты, породного состава, продуктивности и типов леса насаждений, сформировавшихся на осушенных безлесных болотах с различной торфяной залежью. Изменения, происходящие в фитоценозах с увеличением их возраста, связаны с постепенным улучшением почвенных условий после осушения. Формирующиеся лесные фитоценозы активно участвуют в биологическом круговороте веществ, оказывая влияние на плодородие почв.

Ключевые слова: осушение, торфяная залежь, насаждение, продуктивность, класс бонитета лесорастительных условий, тип леса, опад, отпад

В Карелии осушено 300 тыс. га болот, из них 83 тыс. га передано под сельскохозяйственное пользование, около половины болот оставлено под естественное зарастание. Облесение болот происходит за счет окружающих стен леса, редкой древесной растительности и подроста хвойных пород разного возраста, имевшихся на болотах до осушения. В зависимости от сроков обсеменения и возраста подрост на осушенных болотах происходит формирование одновозрастных или разновозрастных насаждений разной густоты, сомкнутости и породного состава.

О естественном облесении болот за первые 5–10 лет после осушения имеется довольно обширная литература [6], [10], [11] и др. Ряд работ посвящен особенностям формирования насаждений в последующие 20–40 лет [1], [4], [9]. Данных же по дальнейшему ходу их роста, изменению густоты, породного состава и продуктивности нет.

Процесс появления древесной растительности и формирования в дальнейшем насаждений

на осушенных болотах имеет ряд отличий от суходолов. Данные, полученные в результате долговременных исследований хода роста насаждений, возникших на осушенных безлесных болотах, показали, что класс бонитета насаждений с увеличением возраста повышается. Об этом же свидетельствуют таксационные данные, полученные при повторных перерчетах, и сравнение классов бонитета насаждений, произрастающих в одинаковых лесорастительных условиях на объектах с различной давностью осушения. Эта особенность молодняков, формирующихся на осушенных болотах, связана с постепенным изменением экологических условий под влиянием осушения.

Установленная особенность роста насаждений, возникших на осушенных болотах, ставит лесоводов в затруднительное положение при выборе и проведении лесохозяйственных мероприятий. На минеральных почвах основой для назначения мероприятий по уходу за насаждениями и повышению их продуктивности служат



таблицы хода роста, составленные по классам бонитета [13]. В связи с этим было введено понятие «класс бонитета лесорастительных условий» [5], который определялся на основе наивысшего класса бонитета, достигаемого насаждениями, возникшими на осушенных безлесных болотах к 50-летнему возрасту, и составлены таблицы хода роста сосновых насаждений для трех классов бонитета (II, III, IV) южной зоны Карелии [7].

В ходе дальнейших наблюдений было выявлено, что класс бонитета насаждений, сформировавшихся на осушенных болотах, продолжает повышаться и после достижения ими возраста 50 лет. Поэтому для ведения лесного хозяйства на этих площадях, правильного и своевременного выбора и проведения тех или иных лесохозяйственных мероприятий необходимо накопление материалов исследований по изменению классов бонитета лесорастительных условий на осушенных торфяно-болотных почвах с различной торфяной залежью за более длительный срок.

#### ОБЪЕКТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ И МЕТОДИКА

В качестве объектов исследований в Южной Карелии были выбраны три опытных участка

одновозрастных насаждений, возникших на интенсивно осушенных безлесных болотах с различными типами торфяной залежи.

**Опытный участок № 1.** Травяно-сфагновое болото со сложной переходно-низинной торфяной залежью, осушенное в 1930 году сетью неглубоких канав (0,7–0,8 м), расположенных через 40 метров друг от друга. Облесение произошло через 3–5 лет после осушения. Опытный участок заложен в 1973 году, к этому времени на осушенном болоте сформировался одновозрастной хвощово-папоротниковый березняк. Таксационная характеристика приводится в табл. 1.

Мощность торфяной залежи на момент закладки опыта составляла 0,5 м. Верхний слой – 0–22 см, торф переходный осоковый, степень разложения – 25 %, зольность – 6,2 %, ниже – низинный древесный торф, степень разложения – 30 %, зольность – 8,1 %. В напочвенном покрове преобладали: хвощ лесной и папоротники, встречались линнея, грушанка круглолистная, вейник, седмичник, поляника, марьяник. Общее проективное покрытие травяного яруса составляло 80 %. Моховой ярус был представлен плуризоиумом шреберии, проективное покрытие – 20 %. Состояние осушительной сети за время наблюдений удовлетворительное.

Таблица 1

Изменение таксационной характеристики насаждений, сформировавшихся на осушенных болотах

№ участка	Породный состав	Возраст, лет	Средние		Густота, шт. га <sup>-1</sup>	Полнота		Запас, м <sup>3</sup> га <sup>-1</sup>	Класс бонитета	Тип леса
			высота, м	диаметр, см		абсолютная, м <sup>2</sup> га <sup>-1</sup>	относительная			
1	3,0С7,0Б	40	14,5	13,6	2240	27,9	0,90	213	I,5	Березняк хвощово-папоротниковый*
	3,3С6,7Бед.Е	50	17,8	15,9	1750	33,3	1,00	286	I,2	Березняк разнотравный
	4,0С5,9Б0,1Е	65	22,2	20,0	1160	36,4	1,03	317	I,0	Сосняк разнотравно-кисличный
	5,6С4,1Б0,3Е	75	25,2	24,4	908	34,9	0,96	392	Ia,9	Сосняк разнотравно-кисличный
2	4,0С6,0Б	20	2,4	3,0	4180	3,0	0,51	8	IV,8	Сосняк чернично-кустарничковый
	4,3С5,7Б	35	8,2	8,2	2860	14,9	0,63	79	III,8	Сосняк черничный
	5,2С4,8Бед.Е	50	12,1	12,2	2030	20,5	0,71	122	III,3	Сосняк чернично-брусничный
	7,3С2,7Бед.Е	70	17,3	19,1	1386	26,5	0,81	212	II,9	Сосняк чернично-брусничный
3	10Сед.Б	20	2,1	3,6	3660	3,7	0,48	5	IV,9	Сосняк кустарничково-сфагновый
	10Сед.Б	35	6,3	7,6	2370	9,7	0,52	31	IV,6	Сосняк кустарничково-сфагновый
	10Сед.Б	50	9,5	12,0	1410	14,3	0,55	66	IV,2	Сосняк чернично-кустарничковый
	9,9С0,1Бед.Е	70	13,5	14,9	1222	17,6	0,58	115	IV,0	Сосняк чернично-кустарничковый

\* Полное название типа леса – «Березняк хвощово-папоротниковый торфяный осушаемый», далее аналогично [8].

**Опытный участок № 2.** Чистое верхово-переходное болото, осушено в 1930 году осушителями глубиной 0,7–0,8 м, расстояние между ними – 40 метров. Через 5–7 лет после осушения на большей части болотного массива поселились береза и сосна, в центральной части болота облесение произошло только сосной. Опытный участок № 2 заложен в 1957 году ближе к опушке леса, где сформировалось сосново-березовое разновозрастное насаждение. Мощность торфяной залежи – 2,5 м. Верхний слой (0–30 см) сложен верховым магелланикум-торфом, степень разложения – 5–10 %, зольность – 2,2 %, ниже до глубины 1 м – сфагново-пушицевый переходный торф, степень разложения – 25–30 %, зольность – 4,2 %. Травяно-кустарничковый ярус был представлен: черникой, багульником, кассандрой, подбелом, карликовой березой, пушицей, степень проективного покрытия – 70 %. В моховом покрове преобладали: политрихум стриктум и плеурозиум шребери, встречались сфагнумы, лишайники. Степень проективного покрытия – 60 %. Состояние осушительной сети за время наблюдений удовлетворительное.

**Опытный участок № 3.** Заложен в 1957 году на том же болотном массиве, в 200 метрах от участка № 2, в той части болота, где сформировалось разновозрастное сосновое насаждение (табл. 1). Мощность торфяной залежи – 3,0 м. Верхний слой (0–70 см) сложен верховым магелланикум-торфом, степень разложения – 5–10 %, зольность – 2,2 %, ниже до глубины 1 м – сфагново-пушицевый переходный торф, степень разложения – 20–20 %, зольность – 4,1 %. Травяно-кустарничковый ярус был представлен багульником, кассандрой, подбелом, черникой, карликовой березой, пушицей, степень проективного покрытия – 60 %. В моховом покрове преобладали политрихум стриктум и плеурозиум шребери, встречались сфагнумы, лишайники. Степень проективного покрытия – 60 %. Состояние осушительной сети за время наблюдений удовлетворительное.

Учеты проводились по общепринятой методике выполнения таксационных работ на постоянных пробных площадях путем повторных переучетов через 10–15 лет по 2-сантиметровым ступеням толщины. На каждом участке для анализа хода роста были отобраны модельные деревья в количестве 12–15 штук, по диаметру и высоте близкие к среднему диаметру и высоте насаждения, с полным анализом стволов. Классы бонитета насаждений в разном возрасте определялись по стандартной общепониманной таблице семенных насаждений [14]. Для изучения ботанического состава, степени разложения торфа, определения его агрохимических показателей отбирались образцы торфа по 10-сантиметровым слоям до глубины не менее 1 м. Исследования изменения видового состава подростка и напочвенного покрова выполнялись по методике А. Г. Воронова [2].

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Анализ хода роста насаждений, возникших на осушенных болотах с различной торфяной залежью, выполненный по данным повторных переучетов и модельным деревьям на постоянных пробных площадях, показал, что класс бонитета насаждений с увеличением возраста значительно изменяется.

**Таблица 2**

Изменение класса бонитета насаждений, возникших на осушенных болотах с различной торфяной залежью, с увеличением возраста

Возраст насаждения, лет	№ опытного участка		
	1	2	3
	Класс бонитета		
10	III <sub>6</sub>	V <sub>0</sub>	V <sub>1</sub>
20	II <sub>7</sub>	IV <sub>8</sub>	IV <sub>9</sub>
30	II <sub>0</sub>	IV <sub>0</sub>	IV <sub>7</sub>
40	I <sub>5</sub>	III <sub>5</sub>	IV <sub>5</sub>
50	I <sub>2</sub>	III <sub>3</sub>	IV <sub>2</sub>
60	I <sub>0</sub>	III <sub>1</sub>	IV <sub>0</sub>
70	I <sup>a</sup> <sub>9</sub>	II <sub>9</sub>	IV <sub>0</sub>

На переходо-низинной торфяной почве (участок № 1) в 10-летнем возрасте молодняк рос по III<sub>6</sub> классу бонитета, к 70 годам класс бонитета повысился до I<sup>a</sup><sub>9</sub>. На верхово-переходной торфяной почве, где слой верхового торфа составлял 0,3 м (участок № 2), он повысился с V<sub>0</sub> до II<sub>9</sub>, а на верхово-переходной, где слой верхового торфа равен 0,7 м (участок № 3), – с V<sub>1</sub> до IV<sub>0</sub>.

Через 40 лет после осушения травяно-сфагнового болота сформировалось высокополнотное березово-сосновое насаждение с составом 7БЗС, тип леса – хвощово-папоротниковый торфяной осушаемый, с запасом более 200 м<sup>3</sup> га<sup>-1</sup>. При переучете древостоя и отборе модельных деревьев было отмечено массовое поражение стволов березы белой волокнистой ядровой гнилью. За время наблюдений (35 лет) в биогеоценозе произошли существенные изменения. Древостой из категории березово-сосновых перешел в категорию сосново-березовых, количество стволов березы уменьшилось в 4,5 раза, сосны – в 1,8 раза.

Особенно резко увеличился отпад березы в последние 15–20 лет, наблюдалось отмирание деревьев всех ступеней толщины, включая самые крупные, занимающие господствующее положение в составе верхнего полога. Отпад сосны за этот период был незначителен, в основном из нижних ступеней толщины, угнетенных, находящихся под кроной. Сосна заняла лидирующее положение. Значительно увеличилось количество деревьев ели за счет перехода крупного подростка в основной полог. Относительная полнота немного снизилась. Запас древостоя за счет хорошего роста сосны и ели в возрасте 75 лет составил 392 м<sup>3</sup> га<sup>-1</sup>. Класс бонитета за 20 лет увеличился на 0,3. Под пологом формируется еловый ярус (табл. 1).

Таблица 3

Изменение породного состава и густоты насаждений, возникших на различных типах осушенных болот, с увеличением возраста

№ участка	Возраст, лет	Породный состав	Количество, шт. га <sup>-1</sup>			
			сосна	береза	ель	всего
1	40	3,0С7,0Б	524	1716	–	2240
	50	3,3С6,7Бед.Е	408	1318	24	1750
	65	4,0С5,9Б0,1Е	316	780	64	1160
	75	5,6С4,1Б0,3Е	288	396	224	908
2	20	4,0С6,0Б	1560	2620	–	4180
	35	4,3С5,7Бед.Е	1108	1750	2	2860
	50	5,2С4,8Бед.Е	908	1110	12	2030
	70	7,3С2,7Бед.Е	598	713	57	1368
3	20	10Сед.Б	3500	158	2	3660
	35	10Сед.Б	2250	108	12	2370
	50	10Сед.Б,Е	1384	22	4	1410
	70	9,9С0,1Бед.Е	1156	55	11	1222

В напочвенном покрове произошла смена видового состава растительности, преобладают виды трав и мхов, характерные для богатых условий местопроизрастания сосновых древостоев на минеральных почвах. По продуктивности и видовому составу напочвенного покрова насаждение соответствует разнотравно-кисличному торфяному осушаемому типу леса.

На осушенном болоте с верхово-переходной залежью с небольшим слоем верхового торфа в первые годы после появления древесной растительности темпы роста сосны и березы были замедлены. Через 20 лет после осушения сформировался среднеполнотный молодняк чернично-кустарничкового торфяного осушаемого типа леса IV<sub>8</sub> класса бонитета. С увеличением давности осушения произошла осадка торфа, корневые системы сосны и березы достигли более богатого элементами питания слоя переходного торфа, рост растений в высоту значительно улучшился.

С увеличением возраста насаждения доля участия березы в составе уменьшается из-за отпада, вызванного поражением стволов белой волонтистой ядровой гнилью. Густота сосны тоже снижается за счет отмирания отставших в росте деревьев низших ступеней толщины, находящихся под кроной (табл. 3).

За последние 20 лет запас древостоя увеличился на 100 м<sup>3</sup> га<sup>-1</sup>, относительная полнота – на 0,1, класс бонитета – на 0,4. К 70-летнему возрасту сформировалось высокополнотное сосновое насаждение с небольшим участием березы в составе, с запасом 212 м<sup>3</sup> га<sup>-1</sup>, II<sub>9</sub> класса бонитета. Тип леса – чернично-брусничный торфяной осушаемый. В покрове преобладают растения и мхи, характерные для суходольных сосняков этого типа леса (табл. 1).

На верхово-переходной торфяной почве со слоем верхового торфа 70 см даже после осадки торфа корневые системы деревьев не достигают нижележащего, более богатого слоя торфа, и ли-

митирующим фактором, оказывающим отрицательное влияние на рост сосны, является бедность корнеобитаемого слоя почвы элементами питания. К возрасту 70 лет сформировался сосняк чернично-кустарничкового торфяного осушаемого типа с единичным присутствием березы и ели в составе, IV<sub>0</sub> класса бонитета, с запасом 115 м<sup>3</sup> га<sup>-1</sup>. За 20 лет класс бонитета повысился на 0,2.

Изменение продуктивности насаждений, возникших на осушенных болотах, с увеличением их возраста и давности осушения связано с постепенным улучшением почвенных условий после осушения. Понижение уровня почвенно-грунтовых вод увеличивает деятельный горизонт почвы на болотах. С улучшением водно-воздушного режима торфяно-болотных почв в результате их осушения коренным образом изменяются физические, агрохимические, биологические свойства почв, направленность процессов минерализации и гумификации органического вещества, в процесс почвообразования вовлекаются более глубокие слои торфа.

В первые годы после осушения происходят наибольшие изменения – осадка, уплотнение верхнего горизонта, увеличение объемного веса торфа. Изменение зольности торфа – процесс более длительный. Он наблюдается в основном в поверхностных слоях торфа (на глубине до 10–30 см) в связи с разложением и убылью массы растительных остатков и концентрации питательных элементов в меньших объемах торфа. Этот процесс подобен скоплению элементов питания в подстилке древостоев и является следствием трансформации органического вещества под влиянием осушения. Все это способствует концентрации питательных элементов в корнеобитаемом слое почвы.

Характер и скорость происходящих изменений в почве при одинаковой степени осушения зависят от мощности торфяного слоя, строения торфяной залежи, ее ботанического состава, агрохимических свойств. Биохимическая трансформация торфа в основном направлена на минерализацию органических соединений азота и углерода. В низинной торфяной залежи минерализация органического вещества гораздо выше. Торфообразователи верховых почв разлагаются значительно хуже [12].

Лесные фитоценозы, формирующиеся на болотах, активно участвуют в биологическом круговороте веществ и оказывают непосредственное влияние на плодородие почв осушенных болот. Поступление в почву органического вещества происходит за счет опада, растительных остатков, отмирающих надземных и подземных органов растений и корневых выделений. Наличие в составе формирующихся молодняков березы, смена в травяно-кустарничковом ярусе кустарничков на травы, в моховом покрове – сфагновых мхов на гипновые способствуют активизации микробиологических процессов, увеличивается круговорот

элементов питания. Особую роль в увеличении плодородия почв играют богатые элементами питания и относительно доступные почвенной биоте листья березы и травы, которые разлагаются полностью за 3–5 лет. Сфагновые мхи теряют в первый год 8–12 % массы и в дальнейшем практически не принимают участия в круговороте. Хвойный опад, в отличие от березового, претерпевает незначительные изменения на поверхности почвы. Хвоя в слаборазложившемся состоянии поступает в глубь торфяной залежи, где происходит консервация полуразложившихся остатков грубогумусовой природы вследствие заторженности комплекса микроорганизмов, трансформирующих трудногидролизуемые соединения растительных тканей [3].

С увеличением возраста и продуктивности насаждения повышается масса опада. Прогнозируя развитие биогеоценозов во времени, можно предположить, что без вмешательства внешних факторов сдвиг в балансе органического вещества почв произойдет в сторону приходной его части за счет увеличения массы опада. Это окажет положительное влияние на увеличение плодородия почв.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Облесение осушенных болот происходит через 3–7 лет. На травяно-сфагновом болоте со сложной переходно-низинной торфяной залежью на первоначальном этапе формируется высокополнотный березово-сосновый молодняк. В возрасте 40–60 лет наблюдается массовый отпад березы, вызванный поражением стволов березы

гнилью, сосна занимает лидирующее положение в составе. К 75-летнему возрасту класс бонитета повышается до I<sup>a</sup>, а тип леса меняется на разнотравно-кисличный торфяной осушаемый, запас древостоя – 392 м<sup>3</sup> га<sup>-1</sup>.

На болоте с верхово-переходной залежью, где слой верхового торфа 0,3 м, сформировался среднеполнотный сосняк с участием березы в составе. С увеличением возраста густота березы постоянно снижается из-за отпада, вызванного поражением стволов березы гнилью. Роль сосны в составе увеличивается. В возрасте 70 лет насаждение имеет запас 212 м<sup>3</sup> га<sup>-1</sup>, растет по III классу бонитета, тип леса чернично-брусничный торфяной осушаемый.

Наименьшие изменения произошли в насаждении, возникшем на верхово-переходном болоте со слоем верхового торфа 0,7 м. В возрасте 70 лет запас древостоя – 115 м<sup>3</sup> га<sup>-1</sup>, тип леса чернично-кустарничковый торфяной осушаемый, класс бонитета – IV,0.

Изменение продуктивности насаждений, возникших на осушенных болотах, с увеличением их возраста и давности осушения связано с постепенным улучшением почвенных условий после осушения. Характер и скорость происходящих изменений в почве зависят от мощности торфяного слоя, строения торфяной залежи, ее ботанического состава и агрохимических свойств.

Формирующиеся на осушенных болотах лесные фитоценозы оказывают непосредственное влияние на изменение плодородия почв. Особую роль в увеличении плодородия почв играют богатые элементами питания и относительно доступные почвенной биоте листья березы и травы.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Вайнблат В. З., Медведева В. М. Влияние гидроресомелиорации на естественное облесение верховых болот // Природа болотно-лесных систем Карелии и пути их освоения. Петрозаводск: Изд-во Карельского филиала АН СССР, 1982. С. 116–130.
2. Воронов А. Г. Геоботаника. М.: Высшая школа, 1973. 384 с.
3. Германова Н. И., Саковец В. И., Матюшкин В. А. Влияние осушения и рубок на почвенно-биологические процессы в сосняках травяно-сфагновых Южной Карелии // Лесоведение. 2005. № 2. С. 9–15.
4. Ефремов С. П. Естественное залесение осушенных болот лесной зоны Западной Сибири. М.: Наука, 1972. 156 с.
5. Кнize А. А. Рекомендации по таксации осушенных сосняков. Л.: Ротопринт Северо-Западного лесостроительного предприятия, 1972. 34 с.
6. Медведева В. М. Естественное облесение болот // Исследования по лесному болотоведению и мелиорации. Петрозаводск: Изд-во Карельского филиала АН СССР, 1978. С. 95–108.
7. Медведева В. М., Матюшкин В. А. Особенности формирования сосновых насаждений, возникших на осушенных болотах Южной Карелии // Изменение лесоболотных биогеоценозов под влиянием осушения. Петрозаводск: Изд-во Карельского филиала АН СССР, 1986. С. 5–27.
8. Основные положения по гидроресомелиорации / Отв. ред. Б. Л. Волков. СПб.: СПбНИИЛХ, 1995. 59 с.
9. Пятацкий Г. Е. Потенциальная лесоводственная производительность болот Карелии // Болота и заболоченные земли Карелии. Петрозаводск: Карельское книжное изд-во, 1964. С. 114–131.
10. Пятин Г. М. Влияние минеральных удобрений на процесс облесения верховых болот // Осушение и освоение заболоченных земель в Нечерноземной зоне РСФСР. Л.: ЛенНИИЛХ, 1976. С. 70–74.
11. Рубцов В. Г. Кустарничково-сфагновые сосняки и особенности их возобновления в связи с осушением // Осушение и восстановление леса на заболоченных землях Северо-Запада. Л.: ЛенНИИЛХ, 1973. С. 67–72.
12. Саковец В. И., Германова Н. И., Матюшкин В. А. Экологические аспекты гидроресомелиорации в Карелии. Петрозаводск: Изд-во КарНЦ РАН, 2000. 155 с.
13. Синькевич С. М., Зябченко С. С., Ананьев В. А., Федуров В. С., Попов В. А., Васильев И. А., Демин К. К. Наставления по рубкам ухода в лесах Республики Карелия. Петрозаводск: Изд-во КарНЦ РАН, 1995. 39 с.
14. Третьяков Н. В., Горский П. В., Самойлович Г. Г. Справочник таксатора. М.: Лесная промышленность, 1956. 458 с.

УДК 519.876.5

**СЕРГЕЙ БОРИСОВИЧ ВАСИЛЬЕВ**

доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой целлюлозно-бумажных и деревообрабатывающих производств лесоинженерного факультета, Петрозаводский государственный университет  
*servas@psu.karelia.ru*

**ГЕННАДИЙ НИКОЛАЕВИЧ КОЛЕСНИКОВ**

доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой механики, Петрозаводский государственный университет  
*kgn@sampo.ru*

**ЛОГИСТИЧЕСКИЙ ПОДХОД К МОДЕЛИРОВАНИЮ  
ФРАКЦИОНИРОВАНИЯ СЫПУЧИХ МАТЕРИАЛОВ**

Рассмотрена физическая модель фракционирования сыпучих материалов на примере рассева древесной щепы. Показано, что математическое описание данной физической модели сводится к уравнению Ферхюльста. Построена однопараметрическая модель рассева. Приведен пример расчета.

Ключевые слова: сыпучий материал, древесная щепа, фракционирование, рассев, математическая модель, уравнение Ферхюльста

**ВВЕДЕНИЕ**

Разделение на фракции является необходимым технологическим звеном в процессе подготовки разнообразных сыпучих и гранулированных материалов к их дальнейшему использованию. В данной работе рассматривается сыпучий материал, частицы которого различны по крупности, а плотность вещества всех частиц примерно одинакова. В качестве такого материала рассматривается щепа.

Размеры и форма частиц технологической щепы должны отвечать определенным требованиям [1], [2]. Поэтому необходимо разделение массива частиц на фракции. Для фракционирования сыпучих материалов выпускается оборудование с достаточно широким спектром технологических характеристик. Например, указанные на сайте <http://www.pbm.onego.ru/> промышленные установки способны перерабатывать от 80 до 950 насыпных кубических метров щепы в час, обеспечивая эффективность извлечения фракций до 85 %.

В современных экономических условиях конкурентоспособность оборудования достигается при

выполнении ряда условий, к которым относятся: снижение материалоемкости и энергопотребления; повышение надежности и уменьшение эксплуатационных затрат; достаточная универсальность и технологическая гибкость, то есть возможность эффективного функционирования в определенном диапазоне технологических параметров.

В данной работе рассматриваются вопросы, связанные с обоснованием рекомендаций по совершенствованию конструктивно-технологических параметров фракционирования щепы методом рассева на основе применения результатов математического моделирования данного технологического процесса.

Рассматриваемая далее задача построения математической модели относится к классу задач моделирования технологических процессов разделения на фракции сыпучих и гранулированных материалов. При этом с учетом особенностей оборудования и свойств сыпучего материала выполняется разбиение данного класса на подклассы задач, появляющихся при моделировании процессов разделения на фракции разнообразнейших сыпучих материалов, например песка и

щебня в строительной отрасли, щепы и древесных топливных гранул (пеллет) в целлюлозно-бумажной и топливной промышленности, руды на горно-обогатительных предприятиях и т. д.

Большие объемы сыпучих материалов, подлежащих разделению на фракции, возрастающие требования к качеству выпускаемой продукции, к материалоемкости, надежности, универсальности и энергопотреблению оборудования, к экономии затрат на его эксплуатацию предопределяют актуальность исследований, выполняемых с целью совершенствования конструктивно-технологических параметров установок для фракционирования. Для достижения указанной цели необходимо решение комплекса многоплановых задач с применением методов математического моделирования. Необходимы также технологические эксперименты в целях проверки адекватности математических моделей.

Современное состояние экспериментальных и теоретических исследований в области моделирования фракционирования сыпучих строительных материалов отражено, например, в работе [9]. Заметим, что некоторые типы современного оборудования, отвечающие требованиям технологической гибкости, одинаково пригодны для фракционирования минеральных и органических сыпучих материалов [7]. По этой причине результаты решения задач одного из указанных выше подклассов в определенной мере представляют интерес и при рассмотрении других задач данного класса. Например, для разработки методики решения технологической задачи о фракционировании щепы представляют интерес результаты работ [5], [9], [11].

Некоторые особенности фракционирования щепы методом рассева рассмотрены в статье [6], в которой приведена также библиография по затронутой теме. Дополняя эти данные, отметим, что проблема фракционирования сыпучих материалов привлекает внимание исследователей на протяжении всей истории развития промышленного производства. К числу первых работ в области теории фракционирования относится исследование Н. Е. Жуковского [4], выполненное в 1896 году. В этой работе предложена теория движения просеваемого (надрешетного) продукта по поверхности плоского сита, а также обосновано новое для своего времени конструктивное решение устройства для рассева сыпучего материала.

В современной технической литературе фракционирование сыпучего материала методом рассева часто обозначают термином «грохочение» [7], [9].

Анализ литературы показал, что до настоящего времени модели процесса фракционирования не позволяют ответить на многие вопросы, возникающие при проектировании и эксплуатации соответствующего оборудования, что отмечается также в работе [9], в которой с применением теории цепей Маркова предложена математическая модель фракционирования сыпучих

материалов на вибрационных грохотах периодического и непрерывного действия.

Рассмотрим иной подход к построению модели фракционирования сыпучего материала. Следуя общепринятой методологии математического моделирования, рассмотрим прежде всего данный технологический процесс с физической точки зрения. Затем составим математическое описание физической модели и воспользуемся полученной в итоге математической моделью для анализа закономерностей процесса рассева.

#### ФИЗИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ФРАКЦИОНИРОВАНИЯ СЫПУЧЕГО МАТЕРИАЛА МЕТОДОМ РАССЕВА

Описание исследуемого технологического процесса с физической точки зрения может быть сведено к следующей системе понятий и допущений, которые необходимы для обоснования рассматриваемой далее математической модели данного процесса.

1. Исходный продукт, поступающий на сито, представляет собой механическую смесь частиц разной крупности.
2. Соотношение размеров отверстий в сите и размеров частиц таково, что только часть материала остается на сите, а другая его часть проходит через отверстия. Соответственно, различают *надрешетный продукт* и *подрешетный продукт*, а каждая частица в зависимости от крупности может быть названа *проходной* или *непроходной*.
3. Количество непроходных, проходных частиц и общее количество частиц в надрешетном продукте может быть выражено их массой. Объем древесной щепы определяют с учетом уплотнения или разрыхления массива древесных частиц [2].
4. Количество проходных частиц в надрешетном продукте с течением времени уменьшается в процессе рассева.
5. Количество непроходных частиц в надрешетном продукте остается постоянным в процессе рассева. Концентрация непроходных частиц в надрешетном продукте увеличивается в процессе рассева.
6. Непроходных частиц в подрешетном продукте нет. Количество проходных частиц в подрешетном продукте возрастает в процессе рассева.
7. Физико-механические свойства и геометрические параметры частиц фракционируемой смеси в процессе рассева не изменяются.
8. Проходная частица, находящаяся в массиве надрешетного продукта, покидает надрешетный продукт, если достигает поверхности сита и попадает в отверстие. Требуемое для этого время зависит от толщины слоя надрешетного продукта, концентрации проходных частиц, формы отверстий и от других параметров. Предполагается, что на каждом достаточно малом отрезке времени  $\Delta t$

уменьшение количества проходных частиц в надрешетном продукте пропорционально величине  $\Delta t$  и количеству проходных частиц в надрешетном продукте в данный момент времени.

9. *Степень извлечения* проходных частиц из надрешетного продукта равна отношению количества проходных частиц в подрешетном продукте к количеству проходных частиц в надрешетном продукте на старте процесса фракционирования.

#### МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ФРАКЦИОНИРОВАНИЯ

Пусть в момент времени  $t_i = t$  количество непроходных частиц в надрешетном продукте равно  $Q_a$ . Количество проходных частиц в надрешетном продукте в тот же момент времени равно  $Q_b$ . Соответственно, общее количество частиц в надрешетном продукте равно  $Q = Q_a + Q_b$ . Определим концентрацию непроходных и проходных частиц в надрешетном продукте:

$$C_a = Q_a / Q, \quad C_b = Q_b / Q. \quad (1)$$

В момент времени  $t_{i+1} = t + \Delta t$  количество непроходных частиц в надрешетном продукте останется прежним, равным  $Q_a$ . Количество проходных частиц в надрешетном продукте уменьшится на величину  $\Delta Q_b$  и будет равно  $Q_b^* = Q_b - \Delta Q_b$ . Соответственно, общее количество частиц в надрешетном продукте будет равно  $Q^* = Q_a + Q_b - \Delta Q_b = Q - \Delta Q_b$ . Определим концентрацию  $C_a^* = C_a + \Delta C_a$  непроходных частиц в надрешетном продукте при  $t_{i+1} = t + \Delta t$ :

$$C_a + \Delta C_a = \frac{Q_a}{Q^*} = \frac{Q_a}{Q - \Delta Q_b}. \quad (2)$$

Анализ физического содержания моделируемой технологической ситуации позволяет сформулировать гипотезу, что величина  $\Delta Q_b$  пропорциональна продолжительности отрезка времени  $\Delta t$  и количеству проходных частиц в надрешетном продукте  $Q_b$ . Необходимо учитывать также производительность оборудования для данного фракционируемого материала. Пусть

$$\Delta Q_b = \frac{\Delta t}{\tau} Q_b, \quad (3)$$

где  $\tau$  – неизменяющийся с течением времени параметр модели, зависящий от конструктивно-технологических характеристик оборудования и физико-механических свойств фракционируемого материала. Параметр  $\tau$  имеет размерность времени и подлежит определению по результатам технологического эксперимента. Обозначим

$$\Delta \theta = \frac{\Delta t}{\tau}. \quad (4)$$

Подставив (3) в (2), получим с учетом (1) и (4):

$$C_a + \Delta C_a = \frac{C_a}{1 - \Delta C_b}. \quad (5)$$

Перепишем равенство (5) в виде

$$(C_a + \Delta C_a)(1 - \Delta C_b) = C_a \quad (6)$$

или

$$C_a + \Delta C_a - C_a \Delta C_b - \Delta C_a \Delta C_b = C_a.$$

Предполагая, что  $\Delta C_a$  и  $\Delta C_b$  достаточно малы, и пренебрегая произведением  $\Delta C_a \Delta C_b$ , получим с учетом (3) соотношение  $\Delta C_a = C_a \Delta \theta C_b$ , которое запишем в следующем виде:

$$\frac{\Delta C_a}{\Delta \theta} = C_a C_b. \quad (7)$$

Переходя в (7) к пределу при  $\Delta \theta \rightarrow 0$  и учитывая, что  $C_a + C_b = 1$ , то есть  $C_b = 1 - C_a$ , получим дифференциальное уравнение:

$$\frac{dC_a}{d\theta} = C_a(1 - C_a). \quad (8)$$

Здесь  $d\theta = dt / \tau$ . Решение уравнения (8) найдем, используя, например, таблицы интегралов [3]. В итоге, учитывая, что на старте процесса фракционирования концентрация непроходных частиц в надрешетном продукте равна  $C_{a0}$ , получим выражение для определения концентрации непроходных частиц в надрешетном продукте в зависимости от безразмерного параметра времени  $\theta = t / \tau$ .

$$C_a = \left( 1 + \left( \frac{1}{C_{a0}} - 1 \right) e^{-\theta} \right)^{-1}. \quad (9)$$

Выражение (9) может быть записано в следующем стандартном виде:

$$C_a = \frac{C_{a0} e^{\theta}}{1 + C_{a0}(e^{\theta} - 1)}. \quad (10)$$

Уравнение (8) является частным случаем логистического уравнения, которое в 1838 году опубликовал бельгийский математик Ферхюльст (P. F. Verhulst) в связи с исследованием модели роста численности населения [12]. В настоящее время это уравнение, его модификации и обобщения часто используются при построении математических моделей в исследованиях биологических, экологических и экономических проблем. С тече-

нием времени область применений этого уравнения расширяется [10], [12]. Однако применений логистического подхода к построению моделей фракционирования сыпучего материала в известных нам публикациях, в том числе представленных в виде интернет-ресурсов, найти не удалось.

Для практического применения предлагаемой модели необходимо определить значение  $\tau$ . Принимая во внимание, что  $\theta = t/\tau$ , и используя равенство (10), получим следующее соотношение:

$$\tau = \frac{t}{\ln \frac{C_a(1-C_{a0})}{C_{a0}(1-C_a)}}. \quad (11)$$

Параметр  $\tau$  может рассматриваться как некоторая технологическая константа. Для нахождения  $\tau$  (11) достаточно определить по результатам пробного отсева поступившей на переработку щепы концентрацию непроходных частиц в надрешетном продукте  $C_{a0}$  на старте отсева и концентрацию  $C_a$  при фиксированном времени  $t$ .

Установим физический смысл параметра  $\tau$ . Для этого примем  $t = \tau$ , то есть  $\theta = 1$ . Тогда из соотношения (10) следует, что

$$\frac{C_a}{C_{a0}} = \frac{e}{1 + C_{a0}(e-1)}. \quad (12)$$

Таким образом,  $\tau$  представляет собой отрезок времени, по прошествии которого концентрация непроходных частиц в надрешетном продукте увеличится в  $n$  раз,

$$n = e / (1 + C_{a0}(e-1)) \approx 2,73 / (1 + 1,73C_{a0}).$$

Обозначим:  $C_{b0}$  – концентрация проходных частиц в надрешетном продукте на старте процесса фракционирования;  $C_b$  – концентрация проходных частиц в надрешетном продукте по прошествии некоторого времени  $t$ ,  $C_b = 1 - C_a$ ;  $\varepsilon$  – степень извлечения. Тогда в соответствии с приведенным выше определением степени извлечения получим:

$$\varepsilon = \frac{C_{b0} - C_b}{C_{b0}} = 1 - \frac{C_b}{C_{b0}} = \frac{C_a - C_{a0}}{1 - C_{a0}}. \quad (13)$$

#### НЕКОТОРЫЕ ЗАКОНОМЕРНОСТИ ПРОЦЕССА РАССЕВА<sup>1</sup>

Результаты применения предлагаемой методики (см. рисунок) согласуются с экспериментальными и расчетными данными, полученными по другим методикам [5], [9]. Разработанная модель дополняет класс однопараметрических моделей отсева, рассмотренных, например, в статье [8].

Воспользуемся разработанной моделью для анализа некоторых закономерностей исследуемого процесса фракционирования. Представленные на рисунке данные получены при моделировании

трех технологических ситуаций, в каждой из которых фракционируется смесь с начальной концентрацией непроходных частиц в надрешетном продукте  $C_{a0}$ , равной 0,10; 0,25; 0,50. При этом для отсева используется одно и то же оборудование, характеризующееся во всех рассмотренных случаях одним и тем же значением  $\tau = 16,14$  с.

Наибольшая скорость отсева достигается, когда концентрация непроходных частиц в надрешетном продукте равна  $C_a = 0,50$ . Это состояние технологического процесса соответствует точке перегиба на кривой. Дальнейшее увеличение концентрации  $C_a$  происходит с уменьшающейся скоростью.

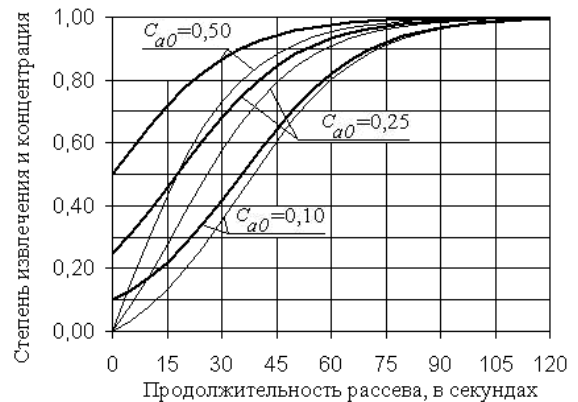
На кривой, построенной при  $C_{a0} = 0,50$ , точка перегиба имеет место при  $t = 0$ . С уменьшением  $C_{a0}$  точка перегиба сдвигается вправо и характер соответствующей логистической кривой на исследуемом интервале времени проявляется более четко.

Изменение начальной концентрации непроходных частиц от  $C_{a0}$  до  $C_{a0}^*$  приводит к сдвигу показанных на рисунке кривых на величину  $t^*$  по оси абсцисс. Значение  $t^*$  определяется из соотношения  $\theta^* = t^* / \tau^*$ . Можно показать, что значение параметра сдвига  $\theta^*$  не зависит от времени и определяется только значениями начальной концентрации непроходных частиц в надрешетном продукте:

$$\theta^* = \ln \frac{C_{a0}(1-C_{a0}^*)}{C_{a0}^*(1-C_{a0})}. \quad (14)$$

При  $\tau^* = \tau = 16,14$  с получим  $t^* = 17,73$  с.

Соотношение (14) может быть использовано для прогнозирования качества продукции, затрат времени, энергии и других ресурсов на фракционирование в зависимости от гранулометрического состава сыпучего материала. При этом изменение параметра  $\tau$  позволяет учесть влияние конструктивных и технологических характеристик оборудования для отсева и оценить его эффективность.



Изменение  $\varepsilon$  (тонкие линии) и  $C_a$  (утолщенные линии) в зависимости от  $C_{a0}$  и  $t$



Рассмотренные закономерности дополняют результаты, известные в данной области прикладных исследований [8], [9], [11].

## ВЫВОДЫ

Результаты решения модельных технологических задач с применением предлагаемой методики (см. рисунок) согласуются с известными данными, полученными другими методами.

Принципиальное отличие предлагаемой модели заключается в том, что она построена с применением логистического подхода. Применение логистического подхода позволило построить новую для затронутой области прикладных исследований модель, которая не является избыточно сложной по структуре, по составу и объему исходных данных, по численной реализации. При этом обеспечивается степень адекватности, достаточная для практического применения при анализе закономерностей фракционирования сыпучих материалов методом отсева.

Появление логистического уравнения Ферхюльста (8) в рассматриваемом случае также неслучайно и является вполне обоснованным с физической точки зрения. Действительно, адекватность математических моделей динамики популяций с учетом продолжительности жизни особей подтверждена многочисленными исследованиями [10], [12]. В нашем случае фракционирования сыпучего материала роль особи играет отдельная проходная частица. Массив про-

ходных частиц играет роль популяции. «Продолжительность жизни» проходной частицы в массиве надрешетного продукта измеряется отрезком времени, в течение которого эта частица пройдет путь до поверхности сита и попадет в одно из отверстий сита. Эти аналогии служат дополнительным подтверждением адекватности предлагаемой модели фракционирования сыпучего материала.

Подходы, базирующиеся на применении логистического уравнения и его обобщений, эффективно применяются во многих других областях прикладных исследований, что подтверждает фундаментальный характер результата, полученного Ферхюльстом в виде данного уравнения и его применений [12]. Отражая внутреннюю логику развития прикладных исследований, выполняемых в затронутой области на основе методологии математического моделирования, предлагаемая модель фракционирования сыпучих материалов закономерно расширяет область продуктивного применения логистического подхода.

Адекватность построенной модели и небольшой объем исходных данных позволяют рекомендовать эту модель для использования при обосновании и оптимизации конструктивных и технологических параметров оборудования, предназначенного для фракционирования древесной щепы и других сыпучих материалов.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (проект № 08-08-00979).

## ПРИМЕЧАНИЕ

- <sup>1</sup> Данная часть работы выполнена при участии аспиранта А. В. Кульбицкого.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гомонай М. В. Технология переработки древесины: Учебное пособие. М.: Московский государственный университет леса, 2002. 232 с.
2. ГОСТ 15815-83\*. Щеп технологическая. Технические условия. М., 1983. 17 с.
3. Двайт Г. Б. Таблицы интегралов и другие математические формулы. М.: Наука, 1977. 224 с.
4. Жуковский Н. Е. Заметка о плоском рассеве // Жуковский Н. Е. Собрание сочинений. Т. 3. М.: ГИТТЛ, 1949. С. 515–522.
5. Журавлев А. Н. Теоретические основы послойного движения сыпучего тела по ситам и вибрирующим поверхностям // Труды Всесоюзного научно-исследовательского института зерна и продуктов его переработки (ВНИИЗ). Вып. 42. 1962. С. 29–46.
6. Кульбицкий А. В., Васильев С. Б. Влияние на стратификацию щепы толщины сортируемого слоя и угла наклона сит // Ученые записки Петрозаводского государственного университета. 2009. № 7. С. 98–101.
7. Лоскутов А. Б., Репин К. В. Грохоты ОАО «НИИпроектасбест» для фракционирования сыпучих строительных материалов // Строительные материалы. 2008. Сентябрь. С. 2–4.
8. Непомнящий Е. А. Применение теории случайных процессов к определению закономерности сепарирования сыпучих смесей // Труды Всесоюзного научно-исследовательского института зерна и продуктов его переработки (ВНИИЗ). Вып. 42. 1962. С. 47–56.
9. Огурцов В. А. Процессы грохочения сыпучих строительных материалов: моделирование, расчет и оптимизация: Автореф. дис. ... д-ра техн. наук. Иваново, 2010.
10. Постан М. Я. Обобщенная логистическая кривая: ее свойства и оценка параметров // Экономика и статистические методы. 1993. Т. 29. Вып. 2. С. 305–310.
11. Цециновский В. М. Элементы теории калибрования семян кукурузы при помощи профилированных сит // Труды Всесоюзного научно-исследовательского института зерна и продуктов его переработки (ВНИИЗ). Вып. 42. 1962. С. 177–188.
12. Verhulst P. F. (1838) // [http://en.wikipedia.org/wiki/Verhulst\\_equation](http://en.wikipedia.org/wiki/Verhulst_equation).

УДК 630\*3

**ИЛЬЯ РОМАНОВИЧ ШЕГЕЛЬМАН**

доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой технологии и оборудования лесного комплекса лесотехнического факультета, проректор по инновационно-производственной деятельности, Петрозаводский государственный университет  
*shegelman@onego.ru*

**ВЛАДИМИР ИВАНОВИЧ СКРЫПНИК**

заведующий лабораторией технологии лесосечных работ и транспорта леса КарНПИЛПК, Петрозаводский государственный университет  
*karniilp@onego.ru*

**АЛЕКСЕЙ ВЛАДИМИРОВИЧ КУЗНЕЦОВ**

кандидат технических наук, доцент кафедры технологии и оборудования лесного комплекса лесотехнического факультета, Петрозаводский государственный университет  
*kuzalex@psu.karelia.ru*

**АНАЛИЗ ПОКАЗАТЕЛЕЙ РАБОТЫ И ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ ЛЕСОЗАГОТОВИТЕЛЬНЫХ МАШИН В РАЗЛИЧНЫХ ПРИРОДНО-ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ УСЛОВИЯХ**

В статье проведен анализ работы и оценка эффективности лесозаготовительных машин на основе предложенного коэффициента технологической проходимости с использованием системы GPS-мониторинга для получения данных, необходимых для расчета. Представленная методика расчета может применяться для выбора оптимальной системы машин для работы в различных природно-производственных условиях.

Ключевые слова: лесозаготовительные машины, несущая способность грунтов, волок, системы машин, оптимальный выбор, коэффициент технологической проходимости

Производительность лесозаготовительных машин, используемых на трелевке и транспортировке лесных грузов (деревьев, хлыстов, сортиментов), нормируется в основном с учетом таких факторов, как объем хлыста и расстояние трелевки. Однако на практике для машин первичного транспорта леса, особенно с колесным движителем, определяющим фактором, который влияет на производительность, является их проходимость, зависящая от параметров движителя, типа грунтов, их увлажнения и несущей способности, а также рельефа местности.

Исследованию проходимости машин посвящены работы Н. Н. Иванова [5], В. Ф. Бабкова [2]; применительно к первичному лесовозному транспорту эти задачи рассматривались и уточнялись В. А. Горбачевским [4], В. Н. Шитовым [16], [17], [18], Д. И. Шеховцовым [14], [15]. Согласно этим исследованиям, проходимость машин первичного транспорта леса определяется коэффициентами сопротивления качению, сопротивления от уклона, сцепления и буксования

(или потери проходимости от буксования), а также соотношением удельного давления на грунт и несущей способности грунта.

Профессор Н. Н. Иванов предложил оценивать проходимость транспортных средств отношением удельной нагрузки от движителя на грунт ( $q$ ) к предельной несущей способности (временному сопротивлению) грунта ( $p$ ). При  $q/p \leq 1$  проходимость обеспечивается при многократных проходах транспортных средств;  $1,5 > q/p > 1$  – проходимость обеспечивается при малом числе проходов по одному следу;  $2 > q/p > 1,5$  – проходимость становится затруднительной при 2–3 проездах по одному следу;  $q/p > 2$  – проходимость не обеспечивается [5].

Профессор В. Ф. Бабков предложил возможность движения по деформируемому грунту оценивать критерием проходимости  $\Pi$ , который определяется по формуле:

$$\Pi = k \cdot \varphi - f_{cp} \geq i, \quad (1)$$

где  $k$  – коэффициент сцепной массы машины;  $\phi$  – коэффициент сцепления;  $f_{cp}$  – средний коэффициент сопротивления движению;  $i$  – продольный уклон [2].

$$f_{cp} = \frac{\sum G_n \cdot f_n}{\sum G_n}, \quad (2)$$

где  $G_n$  и  $f_{cp}$  – нагрузка и коэффициент сопротивления движению  $n$ -й оси машины;  $\sum G_n$  – суммарная нагрузка на все колеса машины.

Проходимость считается хорошей при  $\Pi > 0,2$ , удовлетворительной при  $0,1 < \Pi < 0,2$ , затруднительной при  $\Pi = 0,1-0,05$  и неудовлетворительной при  $\Pi = 0-0,05$ .

Для оценки проходимости машин, осуществляющих трелевку деревьев (хлыстов) в полупогруженном положении, принимается следующая зависимость [13]:

$$\Pi = (k + Ck_1) \cdot \phi - f_{cp}(1 + Ck_1) - f_2(1 - Ck_1) \geq i, \quad (3)$$

где  $k_1$  – коэффициент, учитывающий часть веса пачки деревьев (хлыстов), приходящейся на трелевочную машину,  $f_2$  – коэффициент сопротивления движению волочащейся пачки хлыстов.

$$C = \frac{G_1}{G}, \quad (4)$$

где  $G_1$  – вес (масса) пачки хлыстов, кг;  $G$  – вес (масса) машины, кг.

Критерий проходимости, определяемый по формуле (3), дифференцируется следующим образом: проходимость считается хорошей при  $\Pi > 0,3$ , удовлетворительной при  $0,15 < \Pi < 0,3$ , затруднительной при  $\Pi = 0,15-0,05$  и неудовлетворительной при  $\Pi = 0-0,05$ .

На практике проходимость лесозаготовительных машин тесно связана с почвенно-грунтовыми условиями, условиями увлажнения и рельефом местности. Почвенно-грунтовые условия по их эксплуатационным показателям для лесосечных работ делятся на четыре категории, каждая из которых определяется в процентном отношении от всей покрытой лесом площади [16], [17].

I категория («сухие почвы») с лесозаготовительной точки зрения характерна тем, что на лесосеках с этими почвами возможна работа в течение всего года с небольшими перерывами ранней весной, после схода снега. Осадки в летний и осенний периоды на лесосеках с такими почвенно-грунтовыми условиями не влияют на проходимость машин. К I категории относятся сухие пески, каменистая почва.

II категория («свежие почвы») с лесозаготовительной точки зрения является вполне удовлетворительной. Почвенно-грунтовые усло-

вия допускают многократный проход машины по одному следу и свободное перемещение рабочих. В периоды весенней и осенней распутицы их несущая способность заметно падает, но летние осадки мало влияют на проходимость машин. Ко II категории относят супесчаные почвы, мелкие суглинки, глинистые пески.

III категория («влажные почвы») характерна тем, что влажность почвы остается значительной в течение всего теплого периода. Тракторы быстро разрушают растительный слой и образуют глубокие колеи на волоках. В периоды распутицы волокнистые превращаются в пльвуны, дожди вызывают сильную загрязненность волоков, погрузочных площадок, трелевочной древесины. К III категории относятся суглинистые и глинистые почвы, супеси с глинистыми прослойками.

IV категория («сырые почвы») наиболее неблагоприятна для лесозаготовительных работ. Избыточно увлажненные почвы снижают проходимость машин. В периоды распутицы лесосеки становятся совершенно непроезжими, волокнистые заполнены жидкой грязью даже в сухую погоду. Эта группа почв характерна для насаждений на застойно-сырых и заболоченных местах, по понижениям вдоль рек и ручьев, по проточно-сырым логам. Почвы – торфяно-болотистые, перегнойно-глеевые.

В местности, где преобладают недренирующие грунты – глинистые и глинистые пылеватые, их несущая способность в период избыточного увлажнения резко снижается, что приводит к интенсивному колееобразованию, увеличению коэффициента сопротивления движению и снижению коэффициента сцепления.

Кроме четырех категорий почвенно-грунтовых условий лесозаготовительные площади включают и заболоченные участки. Болота разделяют на три типа: I – болота, до дна заполненные торфом устойчивой консистенции; II – болота, до дна заполненные смесью неустойчивой консистенции; III – болота с плавающим на воде слоем торфа или без торфа. Указанная классификация применима и для лесосечных работ: по болотам I типа возможны многократные проходы тракторов, по болотам II типа – единичные проходы, а болота III типа непроходимы или опасны для прохода тракторов и рабочих.

Рельеф местности характеризуется формой и углами склонов [12]. Теоретически и экспериментально доказано, что трелевка леса гусеничными трелевочными тракторами возможна при уклонах на лесосеке крутизной до  $25^\circ$  летом и до  $15^\circ$  зимой. В зависимости от рельефа леса распределяют на три группы: равнинные, с крутизной склонов от  $0$  до  $15^\circ$ , где работают обычные трелевочные тракторы; холмистые, с крутизной склонов от  $16$  до  $25^\circ$ , на склонах которых тракторы могут работать, но с ограничениями по силе тяги и по устойчивости; горные, с крутизной склонов свыше  $26^\circ$ , где требуется применение

специальных трелевочных средств. Лесозэксплуатационные площади с крутизной склонов свыше  $15^\circ$  имеют сравнительно небольшой удельный вес, немногим более 10 %, в том числе склоны крутизной  $25^\circ$  и выше – около 3 %.

Несущая способность грунта определяется пенетрационным методом – замером среднего усилия вдавливания зонда в грунт на глубину, равную глубине пластической деформаций под машиной (50–70 см). На практике этот показатель определяется ударником ДорНИИ, так как показатели пенетрационных приборов хорошо корректируются. Замеры ударником начинаются на поверхности грунта после снятия растительной подстилки и проводятся по четырем горизонтам через 10 см. Для каждого горизонта определяется число ударов до полного заглубления наконечника прибора. Для расчета принимается среднее количество ударов.

Несущая способность грунтов определяется по формуле [15]:

$$p = 0,223 \cdot N, \quad (5)$$

где  $N$  – число ударов до полного заглубления наконечника прибора.

Несущая способность грунтов в первой категории местности («сухие почвы») в самых неблагоприятных условиях не опускается ниже  $2 \text{ кг/см}^2$  и, как правило, составляет 3–4  $\text{кг/см}^2$ . Верхний предел несущей способности грунтов во второй категории местности («свежие почвы») – 2  $\text{кг/см}^2$ , нижний – 1,4  $\text{кг/см}^2$ . Верхний предел несущей способности грунтов в третьей категории местности («влажные почвы») – 1,4  $\text{кг/см}^2$ , нижний – 0,8  $\text{кг/см}^2$ . Модуль деформаций грунта изменяется от 10,5 МПа в нижнем пределе первого типа местности до 6,5–3,8 МПа в нижнем пределе второго типа местности.

В производственных условиях возможность прохода машин по лесной целине зависит от двух факторов: от сопротивления движению машины и от сцепления гусениц или ведущих колес с грунтом. Проходимость машин в лесу имеет две разновидности, одинаково важные для лесосечных работ.

Первая – это способность машины делать единичные проходы по всей территории лесосеки. В этом случае машина идет по растительному грунту, который после одного-двух проходов машины обычно не разрушается, а лишь уплотняется. Проходимость машины в широком смысле связана здесь не только с ограничениями по грунтовым условиям, но и с преодолением различного рода препятствий – пней, валунов, валежника.

Вторая – это способность машины передвигаться по волоку. После многократных проходов по одному и тому же месту трактор полностью разрушает растительный слой и передвигается по минеральному грунту. В условиях избы-

точного увлажнения трактор пробивает колею, деформирует грунт волочащимися концами хлыстов, в результате чего волок приобретает вид траншеи, заполненной пластической смесью из минеральной основы, гумуса, а иногда и торфа.

Погружаясь в слабый грунт при последовательных проходах, машина испытывает все возрастающее сопротивление движению вследствие увеличения глубины колеи. При значительном погружении клиренс полностью выбирается, и машина начинает прессовать грунт задним мостом. При этом уменьшается сцепление гусениц или ведущих колес с грунтом. Если мощность двигателя мала для того, чтобы преодолеть возросшее сопротивление, или если сила сцепления окажется недостаточной, машина не сможет преодолеть данный участок волока. Анализ данных показывает, что удельное давление на грунт гусеничных трелевочных машин находится в диапазоне 0,33–0,6  $\text{кг/см}^2$ , а колесных – 1,5–2,1  $\text{кг/см}^2$ , то есть больше в 3,5–6 раз [6], [7].

Стоит отметить, что данные по удельным давлениям зарубежных тракторов с колесным двигателем, приводимые в проспектах и каталогах, несопоставимы с аналогичными данными отечественных колесных и гусеничных тракторов, так как получены по другой методике. При определении среднего давления на грунт по скандинавской методике предполагается, что колесо погружено в грунт на  $0,15D$  ( $D$  – наружный диаметр колеса), за счет чего увеличивается площадь контакта с поверхностью. Согласно действующему у нас ГОСТ 26955-86, удельное давление на грунт колесного двигателя определяется путем деления нагрузки на колесо на площадь отпечатка колеса на жестком основании. Удельное давление на грунт принимается на 10 % меньше, чем на жесткой поверхности. Среднее давление, рассчитанное по скандинавской методике, в 2–3 раза меньше, чем полученное по действующему у нас стандарту.

Для снижения удельного давления на грунт и повышения проходимости машин с колесным двигателем они оборудуются гусеничными лентами, которые в машинах с колесной формулой 6 x 6 охватывают колеса задней тележки, на передних колесах устанавливаются цепи. Колесные машины с колесной формулой 8 x 8 оборудуются гусеничными лентами на передних и задних тележках. Это приводит к повышению проходимости за счет значительного повышения коэффициента сцепления и снижения интенсивности колеобразования из-за существенного снижения удельного давления на грунт. Однако проводимые расчеты и экспериментальные исследования показали, что при установке гусеничных лент удельное давление снижается примерно в 1,5–2 раза, с 1,5–2 до 1–0,8  $\text{кг/см}^2$ , что значительно выше, чем у гусеничных тракторов и машин.

Проведенными ранее исследованиями [8], [15] доказано, что специализированные колесные тре-

левочные тракторы в летнее время могут успешно эксплуатироваться на участках первого и второго типа местности (43 % лесозаготовительных площадей), на которых сосредоточено 51,5 % полного суммарного эксплуатационного запаса леса.

Исследователи в своих работах основное внимание уделяли технической проходимости, то есть способности лесозаготовительных и лесотранспортных машин передвигаться по лесосеке с определенной силой тяги без нарушения или при допуске нарушения структуры почвы и несущей способности грунтов и возможности преодоления различных препятствий (пней, валунов, валежника). Однако указанные зависимости и показатели не дают возможности в полной мере оценить эффективность работы лесных машин. Поэтому необходимо было предложить такой критерий проходимости, который дал бы возможность увязать в одну систему все основные показатели работы лесных машин, в первую очередь их производительность.

В работах Центрального научно-исследовательского автомобильного и автомоторного института и профессора Г. М. Анисимова [1] рассмотрена взаимосвязь проходимости лесотранспортных машин с полезной нагрузкой, расстоянием трелевки, временем движения, расходом топлива, то есть функция  $\Pi_{np} = f(Q_{пол}; S; t; g)$ , согласно которой комплексный фактор проходимости колесных и гусеничных машин на трелевке древесины определяется по следующей формуле:

$$\Pi_{np} = \frac{Q_m \cdot S_m \cdot t_g \cdot g_g}{Q_g \cdot S_g \cdot t_m \cdot g_m} = \frac{Q_m \cdot v_m \cdot g_g}{Q_g \cdot v_g \cdot g_m}, \quad (6)$$

где  $Q_m$  и  $Q_g$  – полезная нагрузка при движении по трудному и эталонному участку пути соответственно, м<sup>3</sup>;  $S_m$  и  $S_g$  – протяженность трудного и эталонного участка пути соответственно, км;  $t_m$  и  $t_g$  – время движения машины по трудному и эталонному участку пути соответственно, с;  $g_m$  и  $g_g$  – расход топлива при движении по трудному и эталонному участку пути соответственно, л(т)/км;  $v_m$  и  $v_g$  – скорость движения машины по трудному и эталонному участку пути соответственно, км/ч.

Формула (6) учитывает энергетические свойства транспортной системы, но не полностью определяет влияние природно-производственных условий на технико-экономические показатели работы, прежде всего производительность. Кроме того, при определении по формуле (6) комплексного фактора проходимости  $\Pi_{np}$  величина скорости движения  $v_m$  принимается одинаково на всем расстоянии трелевки, тогда как, зачастую, в производственных условиях в пределах лесосеки имеются участки с различной несущей способностью грунтов и рельефом местности.

Для учета влияния этих факторов предлагается ввести показатель, характеризующий сменную

производительность лесотранспортных машин в эталонных и трудных природно-производственных условиях, – коэффициент технологической проходимости ( $K_{mn}$ )  $K_{mn} = f(\Pi_{cm}; g)$ . Термин «коэффициент технологической проходимости» имеет не только технический, но и технологический смысл, отражающий как техническую проходимость, так и технологическую производительность транспортных машин на лесосечных работах и на вывозке. Коэффициент технологической проходимости определяется по формуле:

$$K_{mn} = \frac{\Pi_{cm}^m \cdot g_g}{\Pi_{cm}^g \cdot g_m}, \quad (7)$$

где  $\Pi_{cm}^t$  и  $\Pi_{cm}^g$  – сменная производительность машин при движении по трудному и эталонному участку пути соответственно, м<sup>3</sup>/смену;  $g_m$  и  $g_g$  – расход топлива при движении по трудному и эталонному участку пути соответственно, л(т)/км.

В благоприятных (эталонных) условиях эксплуатации трелевка деревьев, хлыстов и сортиментов осуществляется по кратчайшему расстоянию трелевки, с транспортировкой пачки, максимальный объем которой ограничивается лишь вместимостью накопительного устройства транспортного средства (коник, пачковый захват, количество чокеров для захвата деревьев, объем кузова для транспортировки сортиментов).

При этом следует учитывать, что  $S_m$ , как правило, больше  $S_g$ ; это связано с необходимостью объезда заболоченных участков, участков с низкой несущей способностью грунтов и сильно пересеченным рельефом. Кроме этого зачастую имеются случаи застревания, что снижает нагрузку на рейс. Тогда  $\Pi_{cm}^m$  определяется по формуле:

$$\Pi_{cm}^m = \frac{(T_{cm} - t_{n3}) \cdot Q_p \cdot k_g}{t_{xx} + t_{fn} + t_{nep} + t_{zx} + t_{разгр} + t_m + t_z + t_{yn}}, \quad (8)$$

где  $Q_p$  – рейсовая нагрузка, м<sup>3</sup>;  $t_{xx}$ ,  $t_{tx}$  – время движения в холостом и грузовом направлениях, с;  $t_{fn}$  – время формирования пачки, с;  $t_{nep}$  – время передвижения при наборе пачки, с;  $t_{разгр}$  – время на разгрузку и штабелевку, с;  $t_m$  – время на маневрирование, с;  $t_z$  – время застревания, с;  $t_{yn}$  – время укладки настила, с.

С учетом того что в реальных условиях эксплуатации лесотранспортная машина движется в порожнем и грузовом направлениях по местности с различными типами почвогрунтов, отчего проходимость меняется, получим:

$$t_{xx} = \frac{S_1^{xx}}{v_1^{xx}} + \frac{S_2^{xx}}{v_2^{xx}} + \frac{S_3^{xx}}{v_3^{xx}} + \frac{S_4^{xx}}{v_4^{xx}}, \quad t_{xx} = \sum_{i=1}^n \frac{S_i^{xx}}{v_i^{xx}}, \quad (9)$$

где  $S_1^{xx}$ ,  $S_2^{xx}$ ,  $S_3^{xx}$ ,  $S_4^{xx}$  – расстояния при движении трактора в порожнем направлении соответ-

ственно в первой, второй, третьей и четвертой категориях почвогрунтов по условиям проходимости, м;  $v_1^{xx}, v_2^{xx}, v_3^{xx}, v_4^{xx}$  – скорости движения трактора в порожнем направлении соответственно в первой, второй, третьей и четвертой категориях почвогрунтов по условиям проходимости, м/с;  $L_{xx}$  – общее расстояние при движении трактора в порожнем направлении, м;  $S_i^{xx}$  – расстояние при движении трактора в порожнем направлении i-й категории почвогрунтов по условиям проходимости, м;  $v_i^{xx}$  – скорость движения трактора в порожнем направлении в i-й категории почвогрунтов по условиям проходимости, м/с;  $n$  – число категорий почвогрунтов по условиям проходимости.

$$t_{zx} = \frac{S_1^{zx}}{v_1^{zx}} + \frac{S_2^{zx}}{v_2^{zx}} + \frac{S_3^{zx}}{v_3^{zx}} + \frac{S_4^{zx}}{v_4^{zx}}, \quad t_{xx} = \sum_{i=1}^n \frac{S_i^{zx}}{v_i^{zx}}, \quad (10)$$

где  $S_1^{zx}, S_2^{zx}, S_3^{zx}, S_4^{zx}$  – расстояния при движении трактора в грузовом направлении в первой, второй, третьей и четвертой категориях почвогрунтов соответственно по условиям проходимости, м;  $v_1^{zx}, v_2^{zx}, v_3^{zx}, v_4^{zx}$  – скорости движения трактора в грузовом направлении соответственно в первой, второй, третьей и четвертой категориях почвогрунтов по условиям проходимости, м/с;  $L_{zx}$  – общее расстояние при движении трактора в грузовом направлении, м;  $S_i^{zx}$  – расстояние при движении трактора в грузовом направлении в i-й категории почвогрунтов по условиям проходимости, м;  $v_i^{zx}$  – скорость движения трактора в грузовом направлении в i-й категории почвогрунтов по условиям проходимости, м/с.

Для оценки правомерности указанного подхода для определения коэффициента технологической проходимости проведены исследования по определению влияния природно-производственных условий на скорость движения, количество застреваний, времени укладки настила и др. Исследования проводились при заготовке леса в 3 лесосеках, отличающихся по условиям проходимости и рельефа.

Методика заключалась в следующем. Первоначально для каждой лесосеки составлялся абрис с указанием участков различной категории почвогрунтов по несущей способности и условиям рельефа. Для этого лесосека обходилась по контуру, а также через 50–70 м в двух перпендикулярных направлениях. При этом с помощью переносного прибора GPS фиксировались расстояние, уклоны местности.

В характерных точках с использованием ударника ДорНИИ по известной методике [9], [14], [15] определялась несущая способность грунтов. Определение уклонов местности дублировалось измерениями нивелиром или высотомером. После этого исследовалась работа форвардера JohnDeere1110 D при трелевке сортиментов после работы харвестера JohnDeere 1270 D. Проводились визуальные хронометражные

наблюдения за работой форвардеров, а также велась запись показателей работы форвардера с использованием системы GPS-мониторинга транспорта, установленной на тракторе [11].

В процессе хронометражных наблюдений фиксировались расстояния и время движения холостым и грузовым ходом, время набора пачки, время разгрузки и укладки сортиментов в штабеля, объем пачки сортиментов, время маневрирования, показания работы в критических ситуациях (интенсивное буксование, застревания). Фиксировались также способы и время выхода из критических ситуаций, в том числе разгрузка с последующей погрузкой и движением по новой колее, укладка настила, вытаскивание другим транспортным средством.

С помощью системы GPS-мониторинга для каждого рейса фиксировались показатели по времени выполнения тех же основных операций производственного цикла, что и при производстве хронометражных наблюдений, а также уклоны, преодолеваемые форвардером в процессе движения по лесосеке.

На первой лесосеке заготовка леса производилась в зимнее время, рельеф равнинный, глубина снежного покрова составила 35–45 см. Грунты в замерзшем состоянии, проходимость машин на всей территории лесосеки обеспечена. Разработка лесосеки велась методом «широкого фронта», трелевка осуществлялась по кратчайшему расстоянию в штабеля, уложенные вдоль дороги. Расстояние трелевки – 215 м, производительность на час чистого времени – 16,2 м<sup>3</sup>.

На второй лесосеке в условиях равнинного рельефа 90 % площади относились к первой и второй категориям почвогрунтов по условиям проходимости (лес брусничник и черничник), 10 % местности, примыкающей к лесовозной дороге, соответствовали третьей категории почвогрунтов. Поэтому форвардер с грузом мог на отдельных участках сделать всего 1–2 прохода по одному месту без застревания. Ввиду того что участок с низкой несущей способностью грунтов примыкал к единственному погрузочному пункту, по производственной необходимости требовалось обеспечить 80–100 проходов по одной колее. Для этого потребовалось на расстоянии 40–50 м сделать сплошной настил. Среднее расстояние трелевки сортиментов после харвестера на данном участке составило 240 м, производительность на час чистого времени – 13,85 м<sup>3</sup>.

Третья лесосека разрабатывалась в начале ноября 2009 года в трудных условиях эксплуатации и по своим характеристикам должна относиться к зимнему лесфонду. Однако ввиду задержки наступления устойчивых холодов и отсутствия резервных лесосек летнего лесфонда предприятие вынуждено было осваивать эту лесосеку в безморозный период.

На большей части лесосеки (рис. 1) преобладали грунты, соответствующие третьей категории почвогрунтов, при практически 100 % ув-

лажнении, рельеф местности – равнинный. В центре лесосеки имелся протяженный возвышенный участок (хребет) с грунтами первой и второй категорий по условиям проходимости.



Рис. 1. Лесосека с третьей категорией почвогрунтов

Несущая способность грунтов, определенная по описанной выше методике, составила на основной части лесосеки (0,7 общей площади)  $0,6-0,8 \text{ кг/см}^2$ , на возвышенных местах, примерно на одной десятой площади лесосеки, –  $2-2,5 \text{ кг/см}^2$ , на оставшейся площади –  $1,2-1,4 \text{ кг/см}^2$ .

С учетом установки на колеса задней тележки форвардера гусеничных лент среднее расчетное удельное давление на грунт форвардера без груза составило  $0,8 \text{ кг/см}^2$ . При транспортировке на платформе сортиментов в объеме  $12 \text{ м}^3$  массой  $9,6 \text{ т}$  среднее удельное давление возросло и составило  $1,39 \text{ кг/см}^2$ .

В начале разработки лесосеки оператором харвестера производилась валка деревьев на основной площади с низкой несущей способностью грунтов. Обеспечивался единичный проход харвестера на этом участке. После валки, обрезки сучьев, раскряжевки хлыста и укладки низкокачественных сортиментов в настил на части этого участка харвестером форвардер начинал трелевку сортиментов с этого участка. Однако эффективная работа форвардера не обеспечивалась. Форвардер с грузом двигался по участку со значительным буксованием, после второго-третьего прохода по одному и тому же месту форвардер, как правило, застревал (рис. 2). Поэтому на значительном протяжении был уложен сплошной настил.



Рис. 2. Застревание форвардера

Однако это не привело к устойчивой работе форвардера, так как он застревал не только на магистральном волоке, но и на пасечных волоках, а в отдельных случаях и при наборе пачки сортиментов. Для выхода из критической ситуации производилась разгрузка форвардера (рис. 3) с последующим набором воза с нового места, укладкой сортиментов под колеса форвардера, вытягиванием форвардера с помощью

другого транспортного средства (форвардера, харвестера, бульдозера, трактора с тросочерным оборудованием).



Рис. 3. Разгрузка форвардера после застревания

После нескольких рейсов в указанном направлении операторы харвестера и форвардера пришли к выводу, что работа форвардера по указанной схеме с трелевкой по кратчайшему расстоянию до погрузочного пункта нецелесообразна, так как в данном случае трелевка на всем расстоянии осуществляется по участкам с низкой несущей способностью грунтов. Поэтому было решено вначале заготавливать сортименты на возвышенных участках местности с их трелевкой на погрузочный пункт по кратчайшему расстоянию. Затем осуществлять трелевку сортиментов форвардером с участков с низкой несущей способностью грунтов по кратчайшему расстоянию до участков, расположенных на возвышенности (хребте), затем на погрузочную площадку, где они рассортировывались и укладывались в штабеля.

С правой стороны от возвышенности лесосеки почвенно-грунтовые условия обеспечивали с учетом укладки лесосечных отходов на пасечный волок несколько проходов форвардера по одному месту, что при небольшом расстоянии трелевки давало возможность производить ее по кратчайшему расстоянию до погрузочного пункта по пасечным волокам. Однако условия рельефа (наличие ложины с откосами  $30-40^\circ$ , проходящей перпендикулярно пасечным волокам) не давали возможности осуществлять это на практике. Поэтому трелевка по пасечным волокам осуществлялась под углом к магистральному волоку, проходящему по возвышенности (хребту) с почвенно-грунтовыми условиями, обеспечивающими многократное перемещение по волоку.

Анализ данных показывает, что в трудных условиях эксплуатации, при наличии на  $55-60 \%$  территории лесосеки грунтов с низкой несущей способностью ( $0,8-0,6 \text{ кг/см}^2$ ), что соответствует нижнему пределу 3-й или 4-й категории почвогрунтов по проходимости, фактическая производительность в сопоставимых условиях по рас-

стоянию трелевки по сравнению с эталонной (1-я категория почвогрунтов) ниже в 2,15–2,2 раза. В осложненных (удовлетворительных) условиях эксплуатации, что соответствует 1-й и 2-й категориям почвогрунтов, фактическая производительность по сравнению с эталонной ниже в 1,1–1,3 раза. Это связано с тем, что скорость движения по лесосеке в трудных условиях в 2,3–2,5 раза ниже, чем в эталонных, расстояние трелевки увеличивается в порожнем направлении в 1,06 раза, а в грузовом – в 1,65 раза из-за необходимости объезда заболоченных участков и единичных препятствий. До 26 % чистого времени работы уходило на застревания форвардера и их устранение путем его разгрузки и набора пачки с нового места, укладки бревен в колею, вытаскивание форвардера с помощью другой машины (харвестера, бульдозера и др.).

В грузовом направлении на основной площади лесосеки при имеющем место соотношении удельного давления от движителя форвардера к несущей способности грунтов до застревания обеспечивался одиночный или двукратный проход по одному следу. При укреплении волоков в процессе работы харвестера порубочными остатками форвардер с грузом мог сделать и три прохода по одному следу. При этом наблюдалось значительное буксование и довольно частое застревание машины. Скорость движения форвардера с грузом составила 25,4 м/мин, в 2 раза ниже, чем на эталонном участке, и в 1,35 раза ниже, чем на участке с удовлетворительными условиями эксплуатации.

На возвышенных участках проходимость форвардера по критерию  $q/p$  обеспечена при достаточном по технологическим условиям лесосеки числе проходов (50–60 по одному следу). В отдельных местах этого участка из-за крутых уклонов затруднена проходимость, из-за чего форвардер двигался на пониженных передачах с невысокой скоростью и значительным буксованием.

В сопоставимых условиях, при среднем расстоянии трелевки 215 м, производительность в эталонных условиях составила 16,2 м<sup>3</sup>/ч, в трудных – 7,5 м<sup>3</sup>/ч, в удовлетворительных – 13,75 м<sup>3</sup>/ч. Удельный расход топлива составил 10 л/м<sup>3</sup> в трудных условиях и 8,5 л/м<sup>3</sup> – в эталонных. Коэффициент технологической проходимости  $K_{тп} = 0,417$ . С изменением среднего расстояния трелевки коэффициент технологической проходимости изменяется. При изменении среднего расстояния транспортировки от 80 до 622,5 м  $K_{тп}$  изменяется от 0,393 до 0,456 (рис. 4). Часовая производительность при работе на трудном участке составит 8,44, 7,5 и 5,88 м<sup>3</sup>/ч, при работе на эталонном участке – 17,59, 16,2 и 13,47 м<sup>3</sup>/ч соответственно, при среднем расстоянии трелевки – 80–622,5 м.

Во второй лесосеке с осложненными условиями эксплуатации (1-я и 2-я категории почвогрунтов по условиям проходимости), когда движение на лесосеке по пасечным волокам обеспе-

чено как без груза, так и с грузом, а проезд форвардера затруднен только по магистральным волокам, где на расстоянии 30–35 м потребовалось устройство сплошного настила, производительность на час чистого времени работы составила 13,75 м<sup>3</sup>/ч, что на 13 % меньше, чем при эталонных условиях.  $K_{тп}$  при среднем расстоянии транспортировки сортиментов 100, 200 и 500 м составил 0,849, 0,807 и 0,732 соответственно.

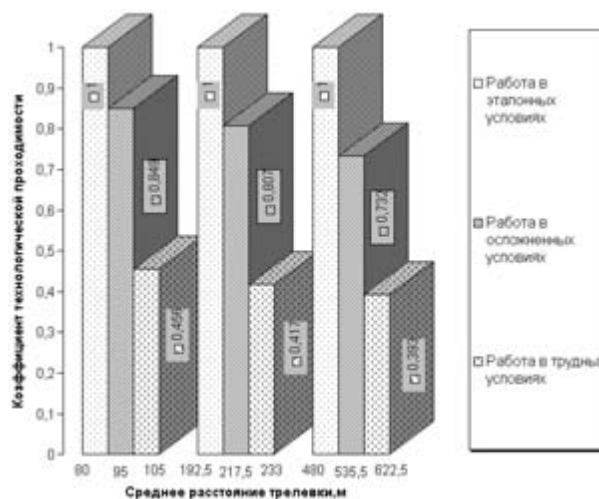


Рис. 4. График зависимости коэффициента технологической проходимости форвардера JohnDeere1110 D от среднего расстояния трелевки

Следует отметить, что в рассмотренном примере заготовки леса комплексом харвестера и форвардера часть площади лесосеки имела удовлетворительные условия по несущей способности грунтов, что позволило до минимума (100–150 м) снизить расстояние трелевки на грунтах 3-й и 4-й категорий в переувлажненном состоянии. Если бы вся площадь лесосеки была представлена грунтами 3-й и 4-й категорий, то освоить такую лесосеку комплексом машин в составе колесных харвестера и форвардера было бы практически невозможно из-за их недостаточной проходимости.

Проведенный анализ показал, что освоение данной лесосеки целесообразно проводить по следующей технологии. На грунтах с низкой несущей способностью валку леса производить харвестером, работающим в режиме валочной машины. Трелевку деревьев с этих участков осуществлять трелевочными тракторами ТБ-1М-15, оснащенными двигателем повышенной проходимости (гусеницы шириной 640 мм вместо 420 мм и с двухступенчатым задним мостом, дающим возможность опустить заднее ведущее колесо и этим увеличить рабочую длину нижней части гусеницы). В результате среднее удельное давление снижается в 1,5 раза, до 0,35 кг/см<sup>2</sup> [6], [7], а в наиболее тяжелых условиях (под задними катками) – в 2–2,5 раза. Максимальный объем трелеваемой пачки деревьев или хлыстов по вместимости коника составляет 8 м<sup>3</sup>, или 6,4–6,8 т.



При трелевке хлыстов или деревьев нагрузка на коник трактора составляет 60–70 % от веса пачки. Таким образом, удельное давление движителя трактора ТБ-1М-15 равно  $0,46 \text{ кг/см}^2$ .

Трелевку трактором ТБ-1М-15 следует производить по кратчайшему направлению до места, где имеется площадка для работы харвестера в режиме процессора (то есть на обрезке сучьев и раскряжке хлыстов) и с которого обеспечивается трелевка сортиментов форвардером при многократных его проходах по одному следу. При среднем расстоянии трелевки трактором ТБ-1М-15 120 м производительность на час чистого времени работы составит  $20 \text{ м}^3$ , производительность форвардера при трелевке сортиментов с участком с 1-й и 2-й категорией почвогрунтов по условиям проходимости на расстояние 100 м –  $20,63 \text{ м}^3$ . Так как на лесосеке с участками с низкой несущей способностью грунтов сосредоточено 80 % леса, производительность на трелевке на человеко-час определяется следующим образом:  $1/P_q = 0,8/20 + 1/20,63 = 0,0885$ ; тогда  $P_q = 11,3 \text{ м}^3/\text{час}$ . Таким образом, производительность на трелевке хлыстов с использованием высокопроходимых гусеничных тракторов выше на 57 %, чем при трелевке сортиментов форвардером.

Допустимым вариантом является использование на подтрелевке с участков с низкой несущей способностью грунтов гусеничных тракторов повышенной проходимости с тросочерным оборудованием (ТЛТ-100-6), среднее удельное давление на грунт которых составляет  $0,33 \text{ кг/см}^2$ , что обеспечивает их производительную работу на участках с 3-й и 4-й категориями почвогрунтов. Однако выработка на человеко-день при этом снижается, производительность трактора ТЛТ-100-06 при расстоянии трелевки до 100 м –  $12,5 \text{ м}^3/\text{ч}$ .

Наиболее эффективным является вариант с использованием на валке и трелевке с участков с низкой несущей способностью грунтов валочно-трелевочных машин (ВТМ) на базе трактора повышенной проходимости с гусеничным движителем (на обрезке сучьев и раскряжке процессора или харвестера, работающего в режиме процессора, на сортировке-штабелевке форвардера).

Себестоимость заготовки указанным комплектом машин по данной технологии по описанному циклу с участием тракторов для трелевки хлыстов (деревьев) ниже, чем системой машин в составе харвестера и форвардера (трелевка сортиментов), на 20 %, производительность выше на 15 %. Кроме того, следует учесть, что при работе форвардера на грунтах с низкой несущей способностью образуется колея глубиной 40–50 см. Правилами рубок допускается наличие колеи на 10–15 % площади лесосеки. При большем проценте площади, на которой образовалась колея, лесозаготовительные предприятия штрафуются органами лесного хозяйства. Наличие глубокой колеи на значительной территории лесосеки ведет к заболачиванию, что затрудняет

лесовосстановление и недопустимо с точки зрения экологии.

Большие затраты машинного времени и значительный расход лесоматериалов требуются и для устройства сплошного настила на значительной части лесосеки. При этом органы лесного хозяйства после освоения лесосеки требуют уборки сплошного настила, что не всегда выполняется из-за того, что он устраивается на наиболее трудных для проходимости машин участках. В результате лесозаготовительные предприятия подвергаются штрафам, что приводит к повышению себестоимости заготовки.

**Выводы.** В настоящее время сортиментный способ заготовки завоевывает все более прочные позиции в лесозаготовительной промышленности России. В целом по стране в сортиментах заготавливается примерно 12 % леса. В Республике Карелия в сортиментах заготавливается до 60 % леса, что обусловлено объективными причинами, в частности наличием в пределах экономически доступного расстояния вывозки леса автопоездами в сортиментах крупных лесоперерабатывающих предприятий (целлюлозно-бумажных комбинатов, лесопильных производств и т. д.) и достаточно развитой сети автомобильных дорог общего пользования.

Основной объем сортиментной заготовки производится двумя комплексами машин зарубежного производства. Первый комплекс машин – в составе бензопил на валке деревьев, обрезке сучьев и раскряжке на сортименты и форвардеров на трелевке, сортировке и штабелевке. Второй комплекс машин – в составе харвестеров на валке деревьев, обрезке сучьев и раскряжке на сортименты и форвардеров, выполняющих те же операции, что и в первом случае. Наиболее распространенным и имеющим значительные перспективы расширения объемов применения имеет второй комплекс машин в составе харвестеров и форвардеров.

Зарубежные фирмы интенсивно рекламируют производимые ими комплексы машин, зачастую преувеличивая технико-экономические показатели (производительность, себестоимость заготовки и др.) и эксплуатационные характеристики, замалчивая недостатки и ограничения по их применению в реальных природно-производственных условиях эксплуатации. В частности, совершенно не анализируются ограничения по эксплуатации машин в тяжелых природно-производственных условиях (низкая несущая способность грунтов, заболоченность, рельефные условия и т. д.), приводятся заниженные данные по удельному давлению на грунт. Внедряется мнение, что эти колесные машины оказывают меньшее отрицательное влияние на окружающую среду, чем машины с гусеничным движителем.

В условиях недостаточного финансирования научных и опытно-конструкторских работ в России и агрессивного маркетинга и рекламы, производимых зарубежными фирмами в средствах

массовой информации, распространилось не-объективное мнение об эффективности и технических возможностях комплексов машин для сортиментной заготовки в составе харвестеров и форвардеров на базе тракторов с колесным двигателем. Считается, что эти машины могут эксплуатироваться в тех же условиях, что и гусеничные машины, и обладают большей надежностью и производительностью.

Анализ показал, что достаточно высокая производительность харвестеров и форвардеров с колесным двигателем достигается лишь при работе в благоприятных природно-производственных условиях при эксплуатации их вахтовым методом в две смены. В этих условиях затраты времени на устранение частых неисправностей демпфируются тем, что оператор имеет значительные резервы времени, так как каждый из них может работать в течение 12 часов в сутки.

Удельное давление на грунт колесных харвестеров и форвардеров (как правило, зарубежного производства) в 3–4 раза выше, чем гусеничных трелевочных тракторов и машин отечественного производства на их базе. При оснащении машин с колесным двигателем гусеничными лентами удельное давление на грунт значительно снижается, но остается примерно в 2 раза выше, чем у отечественных тракторов с гусеничным двигателем. Поэтому работа колесных машин на грунтах с несущей способностью, соответствующей низшему пределу 2-й категории почвогрунтов по условиям проходимости, где гусеничные машины могут сделать многократные проходы по одному следу, затруднена при нескольких проходах по одному следу.

При работе на территории, где преобладают грунты, соответствующие 3-й категории по условиям проходимости, форвардеры с грузом могут сделать не более 1–2 проходов по одному следу, и работа комплекса машин в составе харвестера и форвардера с колесным двигателем недопустима из-за постоянных застреваний, низкой скорости движения, постоянного буксования и нарушений экологических требований, обусловленных образованием глубокой колеи на всей площади лесосеки. Поэтому при расстоянии трелевки более 100 м работа комплекса машин в составе харвестера и форвардера неэффективна, так как производительность снижается не менее, чем на 50–60 % в сравнении с эталонными условиями, а коэффициент технологической проходимости составляет 0,39–0,45.

В условиях Севера, Северо-Запада и Центра России, где сортиментный способ заготовки имеет наибольшие перспективы развития, 65 % лес-

ных площадей, на которых произрастает не менее 54 % леса, имеют почвенно-грунтовые условия (почвогрунты 3-й и 4-й категорий), неблагоприятные для проведения лесосечных работ в безморозный период эксплуатации; в этих условиях в период избыточного увлажнения работа машин с колесным двигателем неэффективна.

Однако из-за недостаточного объема строительства в последние годы дорог круглогодочного действия, несвоевременного отвода лесосек объемы летнего лесфонда снизились, и зачастую лесозаготовительные предприятия значительную часть зимнего лесфонда вынуждены осваивать в безморозный период. Затруднения с заготовкой леса рассматриваемыми комплексами машин для сортиментной заготовки в перспективе будут увеличиваться, так как при освоении лишь части лесфонда с использованием харвестеров и форвардеров имелась возможность выделять для их работы наиболее благоприятные по природно-производственным условиям участки. Увеличение процента освоения лесфонда с использованием колесных харвестеров и форвардеров при наличии большого количества участков с низкой несущей способностью грунтов затруднительно.

Полное освоение лесфонда комплексами машин в составе харвестера и форвардера с колесным двигателем невозможно. Поэтому парк машин для проведения лесосечных работ должен включать и машины на базе гусеничных тракторов повышенной проходимости. Эти машины должны использоваться в основном для трелевки деревьев (хлыстов) на погрузочную площадку, где харвестер, работающий в режиме процессора, производит обрезку сучьев и раскряжевку на сортименты хлыстов. Форвардер в этом случае используется на сортировке и штабелевке сортиментов на погрузочном пункте. Наиболее эффективным является вариант, когда на валке-трелевке деревьев используются валочно-трелевочные машины на базе гусеничного трактора повышенной проходимости.

Выбор оптимального комплекса машин, технологий работы и технологических схем освоения лесосеки производится после обследования лесосеки и сравнения вариантов по описанной выше методике.

Освоение лесосек с трудными по условиям проходимости природно-производственными характеристиками с выбором оптимальных комплексов машин и технологических схем освоения лесосек обеспечит снижение затрат на заготовку леса, повышение производительности машин и выполнение лесоводственных и экологических требований.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Анисимов Г. М., Большаков Б. М. Основы минимизации уплотнения почвы трелевочными системами. СПб.: ЛТА, 1998. 108 с.
2. Бабков В. Ф., Бируля А. К., Сиденко В. М. Проходимость колесных машин по грунту. М.: Авто-транссдат, 1959. 208 с.

3. Виногоров Г. К. Некоторые лесозэксплуатационные характеристики почвенно-грунтовых условий и рельефа // Вопросы технологии и механизации лесосечных работ: Труды ЦНИИМЭ. Химки: ЦНИИМЭ, 1982. С. 5–7.
4. Горбачевский В. А. Работа шин на лесотранспорте. М.: Лесная промышленность, 1970. 120 с.
5. Иванов Н. Н. Основные положения механики грунтов, определяющие проходимость: Труды совещания по проходимости колесных и гусеничных машин по целине и грунтовым дорогам. М.: Изд-во АН СССР, 1950.
6. Исследование технологии работы и параметров машин ОТЗ: Отчет о НИР / КарНИИЛП; Руководитель В. И. Скрыпник. Инв. № 6вн-778-86. Петрозаводск, 1986. 49 с.
7. Исследование технологии работы и параметров машин ОТЗ: Отчет о НИР / КарНИИЛП; Руководитель В. И. Скрыпник. Инв. № 78-893-87. Петрозаводск, 1987. 98 с.
8. Кочегаров В. Г., Бит Ю. А., Меньшиков В. Н. Технология и машины для лесосечных работ: Учебник для вузов. М.: Лесная промышленность, 1990. 392 с.
9. Проведение исследований и разработка рекомендаций по совершенствованию параметров машин ОТЗ: Отчет о НИР / КарНИИЛП; Руководитель В. И. Скрыпник. Инв. № 45-966-89. Петрозаводск, 1989. 124 с.
10. Прохоров В. Б. Эксплуатация машин в лесозаготовительной промышленности. М.: Лесная промышленность, 1978. 304 с.
11. Телеметрические системы. Системы контроля за транспортом: [Электронный ресурс]. Режим доступа к ст.: <http://www.gpsr.ru>.
12. Типизация природно-производственных условий лесозаготовительных районов. Химки: ЦНИИМЭ, 1986. 23 с.
13. Шегельман И. Р., Скрыпник В. И., Галактионов О. Н. Техническое оснащение современных лесозаготовок. СПб.: Профинформ, 2005. 337 с.
14. Шеховцов Д. И. Анализ основных параметров колесных трелевочных тракторов по сравнительным испытаниям // Проблемы исследования базовых лесопромышленных тракторов: Труды ЦНИИМЭ. Химки: ЦНИИМЭ, 1977. С. 63–75.
15. Шеховцов Д. И. Оценка проходимости трелевочных тракторов // Исследования лесопромышленных тракторов: Труды ЦНИИМЭ. Химки: ЦНИИМЭ, 1982. С. 14–15.
16. Шитов В. Н. К вопросу районирования лесных площадей по несущей способности грунтов // Труды ЦНИИМЭ. 1960. № 4. С. 29–35.
17. Шитов В. Н. Исследование природно-производственных условий применения колесных трелевочных машин // Вопросы лесотранспорта: Труды ЦНИИМЭ. Химки: ЦНИИМЭ, 1965. С. 116–149.
18. Шитов В. Н. Экспериментальная проверка проходимости трелевочно-транспортных систем // Вопросы механизации лесосечных работ: Труды ЦНИИМЭ. Химки: ЦНИИМЭ, 1966. С. 123–139.

УДК 628.16

**РЕНАТ ИСХАКОВИЧ АЮКАЕВ**

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

**АННА ВЛАДИМИРОВНА КОРЯЙКИНА**

аспирант кафедры водоснабжения, водоотведения и гидравлики строительного факультета, Петрозаводский государственный университет  
*akoryajkina@yandex.ru*

**АНДРЕЙ СЕРГЕЕВИЧ СЕЛИВАНОВ**

кандидат технических наук, директор ООО «ПСФ Исток»  
*contact@istok-soft.ru*

**ЭФФЕКТИВНОСТЬ БИОСОРБЦИОННОЙ ПРЕДОЧИСТКИ ВЫСОКОЦВЕТНЫХ МАЛОМУТНЫХ ВОД ИЗ ПОВЕРХНОСТНЫХ ВОДОИСТОЧНИКОВ**

В статье рассматриваются возможности применения биологических методов очистки высокоцветных природных вод. Предложена инженерная методика расчета биосорбционных аппаратов, приведены результаты оценки сравнительной эффективности традиционных технологических схем очистки высокоцветных маломутных вод и схем биосорбционной предочистки.

Ключевые слова: технология биосорбции, подготовка высокоцветных маломутных природных вод, поверхностные источники

По данным Госсанэпиднадзора России, качество питьевой воды, производимой коммунальными и ведомственными водопроводами, продолжает оставаться неудовлетворительным: каждая пятая проба питьевой воды не отвечает гигиеническим требованиям по санитарно-химическим и микробиологическим показателям [2]. Значительная часть затрат на строительство водопроводных очистных сооружений может оказаться непроизводительной, поскольку прошедшая очистные сооружения вода не является пригодной для питья. Основными причинами сложившейся ситуации специалисты считают повышенное загрязнение водоисточников вследствие значительно возросшей в последнее время антропогенной нагрузки, а также несоответствие принятой или существующей технологической схемы водоподготовки качеству воды водоисточника.

В настоящее время улучшение качества питьевой воды как в России, так и за рубежом осуществляется при помощи применения дополнительных, часто дорогостоящих методов очистки воды: озонирования, сорбции, ионного обмена, мем-

бранной сепарации и др. [1]; особый интерес представляют относительно малозатратные биологические методы очистки природных вод, которые могут быть использованы для обработки высокоцветных маломутных вод, характерных для поверхностных источников Карелии.

Наиболее простыми сооружениями для биологической очистки воды являются имеющие двухсотлетнюю историю медленные фильтры, в которых протекает процесс пленочного фильтрования. На мелкозернистой фильтрующей загрузке медленного фильтра задерживаются наиболее крупные загрязнения, которые, заклиниваясь в порах, сужают их сечение. Благодаря этому в порах загрузки задерживаются все более мелкие загрязнения, коллоиды и бактерии. Задержанные пленкой бактерии и органические вещества обуславливают возникновение в ней биологических процессов, в том числе развитие низших микроорганизмов, поглощающих бактерии. С течением времени биологические процессы начинают захватывать более глубокие слои фильтра. В результате при медленном фильтро-

вании до 99 % содержащихся в воде бактерий задерживается пленкой и погибает. При небольшой скорости фильтрования и малых размерах пор 90–95 % взвешенных веществ задерживается в верхних слоях фильтра.

Дальнейшее развитие идей медленного фильтрования привело к созданию систем с управляемыми гидробиоценозами, действие которых основано на том, что гидробионты осуществляют процессы минерализации органических веществ, биоседimentации и осветления воды, биологической детоксикации в специально созданных условиях [3]. Для закрепления микроорганизмов обычно применяют биореакторы с насадками для иммобилизованной микрофлоры, размещаемые в голове очистных сооружений. Благодаря иммобилизации создаются условия, способствующие задержанию и росту микроорганизмов-деструкторов трудноокисляемых органических соединений, неспособных развиваться в сооружениях со свободно плавающей биомассой. Исследования возможностей биологической предочистки природных вод в биореакторе с иммобилизованной микрофлорой с последующей реакгентной очисткой на контактных осветлительных и осветлительно-сорбционных фильтрах свидетельствуют об эффективности метода при обработке цветных и высокоцветных вод.

На следующем этапе изучения возможностей биотехнологии в области питьевого водоснабжения был открыт чрезвычайно эффективный метод обработки воды – биосорбция. Это метод, совмещающий процессы сорбции загрязнений и их биологического окисления [5]. Сущность метода можно кратко представить в виде следующей совокупности биологических и физических процессов, протекающих в едином биосорбционном реакторе:

- адсорбция загрязнений воды в микропористой структуре сорбционного материала;
- биологическое разложение адсорбированных, в том числе и трудноразлагаемых, соединений микроорганизмами, иммобилизованными на сорбенте;
- десорбция соединений на поверхность частиц сорбента;
- биологическое окисление соединений микроорганизмами биопленки, образующейся на поверхности частиц сорбента.

В качестве загрузки биосорбционных реакторов (сорбента), как правило, применяется гранулированный активированный уголь, который является носителем, благоприятным для иммобилизации на нем имеющихся в окружающей водной среде микроорганизмов, метаболизирующих биоразлагаемые органические вещества. Благодаря шероховатой поверхности гранул активированного угля и их способности к адсорбции органических молекул, служащих пищей для бактерий, последние имеют возможность прикрепиться к частицам угля и, более того, остаться прикрепленными к ним даже при

воздействии силы сдвига, возникающей в результате промывки или обратного тока воды.

Бактерии, иммобилизующиеся на гранулированных активированных углях, не образуют однородной биологической пленки вокруг гранул, они задерживаются в макропорах загрузки. Большинство этих бактерий характерны для почв и природных вод: *Flavobacterium*, *Acinetobacter*, *Caulobacter*, *Alcaligenes*, *Actinomycetes*, *Bacillus*, *Moraxella* и др.

Существенно для очистки высокоцветных природных вод на биосорбционных реакторах то обстоятельство, что даже при относительно низких концентрациях органических веществ в обрабатываемой воде на поверхности гранулированного активного угля образуется монослой микроорганизмов, сами органические вещества (в том числе и относительно биорезистентные гумусовые вещества, обуславливающие высокую цветность воды) адсорбируются на поверхности угля. При этом происходит ферментативная трансформация органических молекул в биоразлагаемую форму. Модифицированный таким образом субстрат диффундирует в микропоры фильтрующей загрузки, куда способны проникать и экзоферменты микроорганизмов.

В целом применение процесса биосорбции в процессах подготовки воды для хозяйственно-питьевых целей имеет ряд преимуществ по сравнению с традиционными методами водоподготовки [3]: оно позволяет очистить воду от органических соединений, в том числе и трудноокисляемых, обуславливающих высокие значения цветности и перманганатной окисляемости; предотвратить опасность для водопотребителя, связанную с залповыми выбросами токсичных и канцерогенных веществ в водоисточник; сократить расход реагентов, будучи включенным в технологические схемы водоподготовки крупных населенных пунктов в качестве одного из звеньев; минимизировать расход хлорсодержащих реагентов, используемых на этапе обеззараживания обработанных природных вод.

Конструкции аппаратов, использующих биосорбционный эффект для очистки природных вод, могут быть различны. Простейший вариант установки представляет собой колонну с загрузкой из активированного угля, аэратор и распределительное устройство (рис. 1а).

Наблюдения за процессом биосорбции в аппарате такого типа выявили существенный недостаток конструкции. В отсутствие механических префильтров и нисходящей фильтрации в верхних слоях загрузки аккумулируются загрязнения, фильтрационная среда частично коагулируется, а эффект очистки резко снижается. Эффективность очистки снижается и в случае повышения скоростей фильтрации до 0,1–0,2 м/ч. Последнее обстоятельство приводит к необходимости использования «широких» фильтров, что осуществимо в лабораторных условиях, но исключает возможность практического применения. Дальнейшие

эксперименты с установками колонного типа подтвердили жизнеспособность только одного варианта компоновки биосорбера, в котором неочищенная вода движется через сорбент снизу вверх. Кроме того, устойчивый режим работы возможен только при флюидизации (ожижении) сорбента, способствующей также некоторому (на 15–20 %) увеличению удельной скорости очистки, что объясняется максимизацией обмена между биомассой, населяющей сорбент, и водой. Расширение и флюидизация сорбента происходят только при условии превышения скоростью фильтрации некоторого порогового значения.

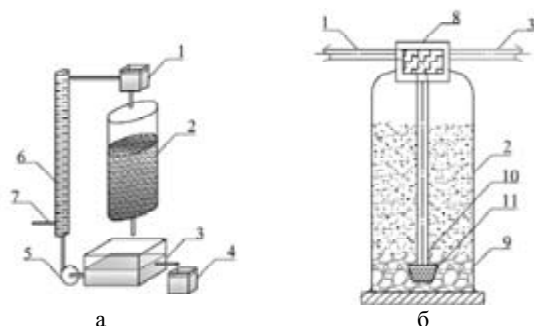


Рис.1. Конструкции биосорбционных аппаратов: а – колонного типа, б – биосорбционный фильтр  
1 – обрабатываемая вода, 2 – загрузка из активированного угля, 3 – очищенная вода, 4 – емкость для сбора фильтра, 5 – циркуляционный насос, 6 – аэрационная колонна, 7 – подача воздуха, 8 – блок управления, 9 – поддерживающий гравийный слой, 10 – центральная распределительная трубка, 11 – нижний распределитель

Схема модернизированного варианта биосорбера колонного типа, названного нами «биосорбционный фильтр», представлена на рис. 1б. В качестве корпуса аппарата во многих случаях удастся использовать корпуса из стекловолокна или нержавеющей стали стандартных засыпных фильтров, широко представленных на рынке водочистного оборудования. Вода подается в фильтр через центральную распределительную трубу и поднимается вверх; при достижении критического значения скорости фильтрации восходящие токи исходной воды взмучивают загрузку и ее объем существенно увеличивается.

Для устойчивого режима работы биосорбционного фильтра с установленным эффектом очистки необходимо выполнение двух групп условий.

Во-первых, масса загрузки фильтра должна отвечать экспериментально определенной удельной скорости очистки по отдельным компонентам. Скорость окисления органических загрязнений в биосорбционном реакторе определяется моделью Моно:

$$\begin{cases} \frac{dX}{dt} = \frac{\mu_m \times S \times X}{K_s + S} \\ \frac{dS}{dt} = -\frac{\mu_m}{Y} \times S \times X \end{cases}, \quad (1)$$

где  $S$ ,  $X$  – весовые концентрации субстрата (органических загрязнений) и биополимеров клетки соответственно,  $\mu_m$  – максимальная скорость роста биомассы,  $Y$  – экономический коэффициент. Величина  $K_s$  определяется как

$$K_s = \frac{k_{-1} + k_{+2}}{k_{+1}} \times M_s,$$

где  $k_{+1}, k_{-1}, k_{+2}$  – константы скоростей ферментативных реакций (знак «+» обозначает прямую реакцию, знак «-» – обратную),  $M_s$  – молекулярный вес субстрата.

Во-вторых, в аппарате должны быть обеспечены гидродинамические условия для протекания процессов биологической деструкции. При достижении критической величины скорости фильтрации, соответствующей началу расширения, потери напора в фильтре стабилизируются и слабее изменяются с дальнейшим увеличением степени расширения.

Потери напора при флюидизации незначительны и не превышают 1 м. в. с. для двухметрового биосорбционного фильтра (при высоте слоя загрузки 70–80 см и 100 % расширении загрузки) для гранулированных активированных углей.

Из гидромеханики известно, что при наличии неподвижного слоя увеличение скорости потока жидкости приводит к увеличению перепада давления в слое. Слой сохраняет неподвижное состояние до тех пор, пока вес слоя, приходящийся на единицу площади, не станет равным перепаду давления. При дальнейшем увеличении скорости слой переходит во флюидизационное состояние и потери напора стабилизируются [4]. Для реального биосорбционного фильтра, как показали проведенные нами эксперименты, участок стабилизации потерь напора в псевдоожиженном слое отсутствует (или, по крайней мере, выражен неявно). Последнее обстоятельство объясняется тем, что для обеспечения флюидизации потока требуется поддерживать скорости движения потока воды в аппарате не ниже 9–10 м/ч, что возможно при вытянутой форме фильтра (высота значительно превышает площадь поперечного сечения). В этих условиях, вероятно, значительный вклад в величину потерь напора вносит эффект взаимодействия гранул сорбента со стенками фильтра.

После обобщения известных теоретических и получения дополнительных экспериментальных данных нами предложена математическая модель биосорбционного фильтра для очистки природных вод, исследование которой доведено до получения инженерной методики расчета биосорбционных аппаратов:

$$M = \frac{(L_0 - L_e) \times Q}{\frac{p_m \times L_e^2}{K_L \times L_0 + L_e^2}}. \quad (2)$$

$$p_m = p_{0m} \times k^{t-t_0}, \quad (3)$$

$$d = \sqrt{\frac{Q \times 4}{24 \times v \times \pi}}, \quad (4)$$

$$h = \frac{4 \times M}{\rho \times \pi \times d^2} \times e_n, \quad (5)$$

$$e_n = 1 - \frac{H_{ads}}{H_{ads}^f} \times (1 - e), \quad e = 1 - \frac{\gamma_{sb}^{нас}}{\gamma_{sb}^{как}}, \quad (6)$$

$$e_n = \left( \frac{a \times Re + b \times Re^2}{Ar} \right)^c, \quad (7)$$

$$Ar = \frac{g \times d_{sb}^3 \times \gamma_{sb}^{ист} - \gamma_b}{\nu^2 \times \gamma_b} \times (1 - P_i), \quad P_i = \frac{\gamma_{sb}^{ист} - \gamma_{sb}^{как}}{\gamma_{sb}^{ист}}, \quad (8)$$

$$\nu = \frac{Re \times \nu}{d_{sb}}, \quad (9)$$

$$\frac{H_{ads}}{H_{ads}^f} = K, \quad (10)$$

где  $M$  – масса сорбента, г,  $Q$  – расход обрабатываемой воды, м<sup>3</sup>/сут,  $L_0$  – обобщенная характеристика загрязнения воды на входе по рассматриваемому ингредиенту, мг/л,  $L_e$  – обобщенная характеристика загрязнения воды на выходе по рассматриваемому ингредиенту, мг/л,  $p_m$  – максимальная удельная скорость окисления ингредиента (в мг) 1 г сорбента за сутки,

$$\left( \frac{\text{мг}}{\text{г} \times \text{сут}} \right),$$

$K_L$  – положительная константа, характеризующая уровень насыщения субстрата,  $k$  – температурная поправка в уравнении Аррениуса (3),  $p_{om}$  – скорость окислительного процесса для рассматриваемого ингредиента при некоторой фиксированной температуре  $t_0$ ,  $t$  – температура обрабатываемой воды,  $d$  – диаметр биосорбционного аппарата, м,  $v$  – скорость движения воды в биосорбционном аппарате, м/с,  $h$  – высота биосорбера, м,  $\rho$  – истинная плотность гранул сорбента, г/м<sup>3</sup>,  $e$  – порозность сорбента,  $e_n$  – порозность расширенного слоя сорбента,  $H_{ads}^f$  – высота флюидизационного слоя, м,  $H_{ads}$  – высота слоя загрузки в неподвижном состоянии, м,  $Re$  – критерий Рейнольдса,  $Ar$  – число Архимеда,  $a$ ,  $b$ ,  $c$  – некоторые константы (приняты в соответствии с рекомендациями [4] равными 18, 0,36, 0,21 соответственно),  $d_{sb}$  – диаметр гранулы сорбента, м,  $\gamma_{sb}^{ист}$  – истинная плотность сорбента, кг/м<sup>3</sup>,  $\gamma_b$  – плотность воды, кг/м<sup>3</sup>,  $P_i$  – удельная пористость сорбента,  $\nu$  – кинематическая вязкость воды, м<sup>2</sup>/с,  $\gamma_{sb}^{как}$  – кажущаяся плотность сорбента, кг/м<sup>3</sup>,  $\gamma_{sb}^{нас}$  – насыпная плотность сорбента, кг/м<sup>3</sup>,  $K$  – коэффициент расширения слоя сорбента.

Уравнение (2), полученное в рамках ферментативной теории Михаэлиса–Ментен, описывает идеализированную схему окисления однокомпонентных загрязнений и связывает скорость окис-

ления с потребной массой сорбционной загрузки в аппарате; уравнение (3) учитывает связь максимальной удельной скорости окисления с температурой среды; уравнения (4), (5) определяют конструктивные размеры фильтра, а соотношения (6)–(9) – расчетную скорость фильтрования при нормированном значении расширения слоя загрузки (10).

Результаты проведенных нами исследований по изучению возможностей биологических методов очистки высокоцветных маломутных вод, в частности технологий биосорбционной предочистки и медленного фильтрования, нашли свое применение на некоторых объектах водоснабжения Республики Карелия и успешно апробированы на ряде объектов. Дальнейшие исследования были направлены на обоснование целесообразности применения технологии биосорбции как самостоятельного или вспомогательного процесса при очистке высокоцветных природных вод, критерием которой является стоимость жизненного цикла водоочистной станции.

Постановка оптимизационной задачи выбора технологической схемы очистных сооружений формулируется следующим образом: из конечного набора станций, состоящих из группы отдельных (независимых) сооружений, выбрать такие, которые при обеспечении необходимого эффекта очистки обладают минимальной стоимостью жизненного цикла.

Для формализованного описания процесса очистки исходной воды на водоочистной станции рассмотрим ориентированный связанный граф, инкапсулирующий структуру водоочистной станции и схематично отображающий процесс переноса  $i$ -го ингредиента, характеризующего один из показателей исходной воды, внутри станции (рис. 2).

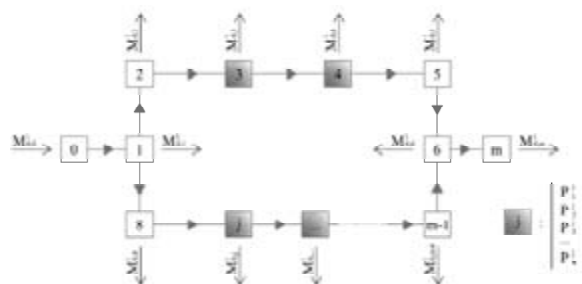


Рис. 2. Граф, инкапсулирующий структуру водоочистной станции

В графе водоочистной станции имеется 3 группы узлов:

- Обыкновенные (узлы 1, 2, 5, 6, 8, m-1 на рис. 2), необходимые для полноты описания коммуникационных связей между сооружениями очистной станции;
- Узел входа в станцию (узел 0) и выхода из станции (узел m);
- Узлы технологического оборудования (узлы 3, 4, j, ... на рис. 2), моделирующие отдельные сооружения очистной станции.

Каждый  $j$ -й узел схемы характеризуется набором из  $n$  параметров  $P_1^j, P_2^j, P_3^j, \dots, P_n^j$ , образующих вектор  $C_{13}$ , с необходимой для моделирования полнотой описывающий элемент коммуникации или сооружение очистной станции. Вектор  $\mathbf{M}^i$  описывает массоперенос  $i$ -го ингредиента внутри станции, а вектор  $\mathbf{M}_0^i$  – подачу (для узла 0) или отбор (для всех остальных узлов) массы  $i$ -го ингредиента внутри станции отдельными сооружениями.

Задача по определению минимальной стоимости жизненного цикла для заданной технологической схемы очистки воды при условии обеспечения ею эффекта очистки до гигиенических требований при наихудших (наибольших) значениях массы  $i$ -го ингредиента на входе в станцию может быть сформулирована следующим образом:

$$A \times \mathbf{M}^i = \mathbf{M}_0^i, \quad (11)$$

$$M_{0,j}^i = M_{0,j}^i \left( P_1^j, P_2^j, \dots, P_n^j, \sum_{k \in IN_j} M_{k-j}^i \right), j \in T, \quad (12)$$

$$M_{0,0}^i = M_{ent,max}^i, \quad (13)$$

$$M_{0,m}^i \leq M_{ex,max}^i, \quad (14)$$

$$\mathbf{P}^j = \mathbf{P}^j (M_{0,j}^i, M_{0,0}^i, M_{0,m}^i), j \in T, \quad (15)$$

$$C = C \left( P_1^1, P_2^1, \dots, P_n^1, P_1^2, P_2^2, \dots, P_n^2, \dots, P_n^m, P_1^m, P_2^m, \dots, P_n^m, E_1, E_2, \dots, E_z \right) \rightarrow \min, \quad (16)$$

где  $A$  – матрица главных сечений графа водоочистной станции,  $\mathbf{M}^i$  – вектор массораспределения  $i$ -го ингредиента на отдельных участках станции,  $\mathbf{M}_0^i$  – вектор отбора массы  $i$ -го ингредиента отдельными узлами (сооружениями) станции,  $M_{k-j}^i$  – компонента вектора  $\mathbf{M}^i$ , представляющая собой массу  $i$ -го ингредиента, переносимого по участку с началом в узле  $k$  и концом в узле  $j$ ,  $\mathbf{P}^1, \mathbf{P}^2, \dots, \mathbf{P}^j, \dots, \mathbf{P}^m$  – набор векторов, полностью определяющих параметры отдельных сооружений станции,  $T$  – множество индексов узлов графа сети очистной станции,  $M_{ent,max}^i$  – максимальная масса  $i$ -го ингредиента на входе в станцию,  $M_{ex,max}^i$  – максимально допустимая (по санитарно-химическим и микробиологическим нормативами) масса  $i$ -го ингредиента на выходе из станции (на входе в магистральную распределительную сеть системы водоснабжения),  $\mathbf{P}^j = \mathbf{P}^j (M_{0,j}^i, M_{0,0}^i, M_{0,m}^i)$  – функции связи, определяющие взаимосвязь массораспределения  $i$ -го ингредиента внутри водоочистной станции и параметры отдельных сооружений станции,  $C = C (P_1^1, P_2^1, \dots, P_n^1, P_1^2, P_2^2, \dots, P_n^2, \dots, P_n^m, P_1^m, P_2^m, \dots, P_n^m, E_1, E_2, \dots, E_z)$  – функция, отражающая стоимость жизненного цикла станции.

Для ряда технологических схем очистки высокоцветных маломутных природных вод при

фиксированной производительности станции и цветности воды в водоисточнике была решена задача (11–16). Результат моделирования – минимально возможная стоимость жизненного цикла водоочистной станции.

Показателем сравнительной эффективности технологических схем является удельная стоимость единицы подготовленной на станции воды питьевого качества, которая для удобства интерпретации измеряется в интервальной шкале в баллах (минимальное значение стоимости очищенной воды соответствует 10 баллам, максимальное – 1 баллу). Результаты сравнения различных технологий очистки цветных вод приведены на рис. 3.

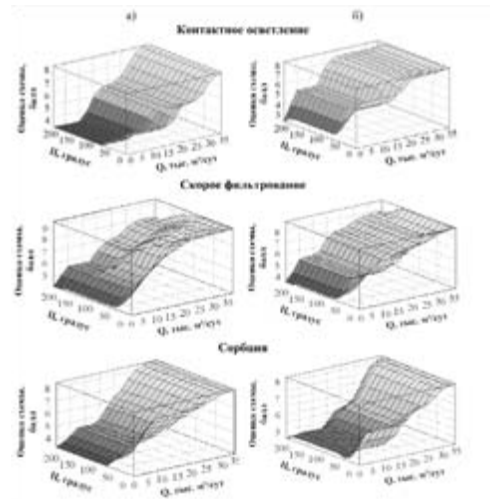


Рис. 3. Результаты моделирования: стоимость жизненного цикла водопроводных очистных сооружений в зависимости от их производительности ( $Q$ ) и цветности ( $C$ ) природных вод: а – для схем без бисорбционной предочистки, б – для схем с бисорбционной предочисткой

Общий вид построенных поверхностей носит вполне предсказуемый характер: с повышением производительности станции себестоимость очистки единицы объема воды значительно снижается, повышение цветности выше некоторого порогового значения, определяющегося технологией очистки воды, приводит к резкому повышению себестоимости очистки. Результаты моделирования свидетельствуют, что включение в технологическую схему сооружений биологической предочистки высокоцветных вод (расчетный при параметрическом моделировании эффект предочистки по цветности равен 40 %) позволяет снизить себестоимость очистки за счет понижения составляющей капитальных затрат, связанных со строительством реагентного хозяйства и сопутствующих структур, а также эксплуатационных затрат на реагенты уже при производительностях от 5000 м³/сут. При предуставленном (в процессе параметризации) эффекте предочистки по цветности 40 % оптимальная область использования биосорбционной предочистки



чистки ограничивается сверху 150–161 градусами платино-кобальтовой шкалы.

При изменении стоимости реагентов в большую сторону эффективность включения в технологическую схему элементов биологической предочистки повышается за счет роста эксплуатационной составляющей, обусловленной использованием реагентов, в стоимости жизненного цикла очистных сооружений и значительно падает нижний предел производительности станций, при котором целесообразно предусматривать такую предочистку (рис. 4).

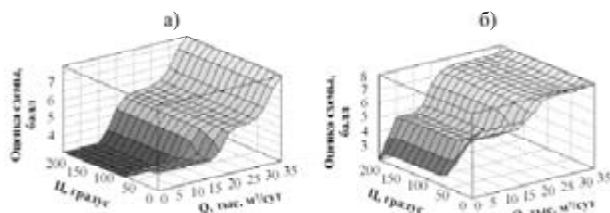


Рис. 4. Результаты моделирования: эффективность использования биосорбционных аппаратов при максимальной (при принятой расчетной схеме) стоимости коагулянта: а – контактное осветление, б – контактное осветление с биосорбционной предочисткой

Как особый случай следует рассматривать очистные сооружения малой производительности в удаленных и труднодоступных районах: соотношение между стоимостью одной тонны коагулянта на заводе и затратами на его доставку в этом случае таковы, что по мере движения вглубь региона стоимость реагента возрастает на порядок, а то и на два. Поскольку для сооружений малой производительности характерно превалирование эксплуатационных затрат над капитальными в стоимости

жизненного цикла, становится очевидной целесообразность использования в данных условиях малозатратных сооружений биологической (пред) очистки природных вод (рис. 5).

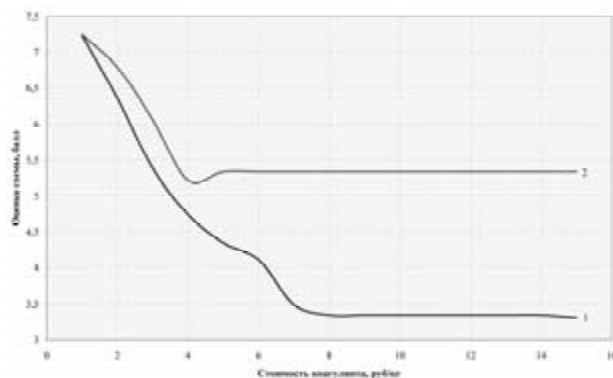


Рис. 5. Результаты моделирования: эффективность технологических схем водоподготовки для очистных сооружений малой производительности: 1 – реагентное скорое фильтрование без биосорбционной предочистки, 2 – реагентное скорое фильтрование с биосорбционной предочисткой

Таким образом, по результатам расчетов отчетливо «вырисовывается» область эффективного применения биосорбционной технологии для предочистки высокоцветных маломутных вод. При фиксировании эффективности предочистки по показателю цветности на уровне 30–40 % наибольший выигрыш по стоимости жизненного цикла очистных станций достигается на малых производительностях (до 100 м³/сут) в случае высокой стоимости реагентов и электроэнергии и в диапазоне расходов от 5000 м³/сут и выше при цветности воды в водоисточнике до 150 градусов.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Водоподготовка / Под ред. С. Е. Беликова. М.: Аква-Терм, 2007. 240 с.
2. Драгинский В. Л., Алексеева Л. П., Гетманцев С. В. Коагуляция в технологии очистки природных вод. М.: Науч. изд-во, 2005. 576 с.
3. Журба М. Г., Соколов Л. И., Говорова Ж. М. Водоснабжение. Проектирование систем и сооружений: В 3 т. Т. 2. Очистка и кондиционирование природных вод. М.: АСВ, 2004. 496 с.
4. Разумов И. М. Псевдооживление и пневмотранспорт сыпучих материалов. М.: Химия, 1972. 240 с.
5. Швецов В. Н., Морозова К. М., Пушкинов М. Ю., Кристаев А. В., Семенов М. Ю. Перспективные технологии биологической очистки сточных и природных вод // Водоснабжение и санитарная техника. 2005. № 12. Ч. 2. С. 17–25.

УДК 711.4

**ЛЮДМИЛА МИХАЙЛОВНА УШАКОВА**

кандидат архитектуры, доцент кафедры архитектуры, строительных конструкций и геотехники строительного факультета, Петрозаводский государственный университет  
*lyudmila.ush@onego.ru*

### **МАЛОЭТАЖНАЯ ВЫСОКОПЛОТНАЯ ЗАСТРОЙКА В РЕКОНСТРУКЦИИ ГОРОДОВ**

Применение высокоплотной малоэтажной застройки при реконструкции новых и старых районов городов, повышение эффективности использования их территории, особые градостроительные условия, создание комфортной жилой среды, сохранение сложившейся архитектурной среды исторических городов – основные факторы использования высокоплотной малоэтажной жилой застройки в реконструируемых районах городов многих стран мира.

Ключевые слова: реконструкция городов, высокоплотная малоэтажная застройка, эффективность использования территории, комфортность проживания

Необходимость повышения эффективности использования территории в реконструируемых районах городов разной величины, создания в них комфортной жилой среды обусловили распространение высокоплотной малоэтажной застройки. В градостроительной практике России малоэтажная застройка повышенной плотности получила распространение в последние десятилетия. Урбанизированная среда современных городов с их проблемами транспорта, дефицитом свободных территорий требует применения застройки специального типа – повышенной плотности.

Жилая среда в современных городах представляет собой пеструю и многообразную картину. Это объясняется различными условиями ее формирования, которые зависят от особенностей градостроительной структуры кварталов и характера их застройки. Особенности кварталов, в свою очередь, зависят от их местоположения в городе: в историческом центре, в срединной зоне, на периферии. Естественно, что каждая из этих зон города создает определенные, свойст-

венные только ей условия формирования жилой среды. Разнообразие пространственной структуры жилой среды города позволяет представить ее в виде 3 типологических групп:

- жилая среда плотно застроенных исторических кварталов центра города;
- жилая среда «рыхлых» кварталов срединной зоны города;
- жилая среда микрорайонов (межмагистральных территорий) в районах нового массового строительства.

*Плотно застроенные исторические кварталы городов* – это смешение различных по времени и характеру происхождения пространственных образований, которые сконцентрировали в себе сгусток городской жизни. Общим недостатком плотно застроенных кварталов являются: наличие морально устаревшего жилого фонда с неудовлетворительными санитарно-гигиеническими условиями, стесненностью, а иногда полное отсутствие внутренних дворовых пространств, рекреационных зон, загазованность, шум и т. п.

«Рыхлые» кварталы срединной зоны городов – это жилая застройка вперемежку с промышленными территориями, складскими сооружениями, транспортными развязками, вокзальными хозяйствами и другими неудобными для соседства с жильем объектами. Территории квартала – улицы, неблагоустроенные дворы, отсюда – неудовлетворительные санитарно-гигиенические условия проживания.

Третий тип жилой среды в городах образуют *микрорайоны* в районах массовой застройки 60-х годов прошлого века. Это монотонные, лишенные всяких ориентиров однообразные пространства, практически без атрибутов жилой среды, если не считать озеленения, навесов у остановок, скамеек у подъездов. В данном случае задачей реконструкции является создание функционально разнообразной пространственной жилой среды.

Одним из средств повышения плотности застройки и комфортности для проживания в вышеперечисленных кварталах будет применение малоэтажных блокированных зданий, внедрение которых в практику массового строительства позволит повысить комфортность проживания и улучшить композиционные качества массовой жилой застройки.

Комфортность проживания в блокированных жилых домах обеспечивается планировочной структурой зданий (рис. 1), отсюда:

- застройка сомасштабна человеку, а значит, психологически комфортна;
- использование Г-образных блок-квартир, скомпонованных по принципу уплотненной атриумной застройки, создает уютные дворы;
- индивидуальный вход в квартиру;
- небольшой палисадник у дома или приквартирный садик позволяют детям и пожилым людям бывать на воздухе;
- наличие гаража на участке или устройство подземных гаражей;
- решаются вопросы демографии – расселение семей из 2–3 поколений;
- пешеходная доступность к объектам обслуживания;
- в архитектуре зданий учитываются национальные и местные особенности.

Кроме того, специфическая планировочная структура блокированных жилых домов позволяет снизить их стоимость по сравнению с усадебными жилыми домами за счет сокращения периметра наружных стен, повышения этажности до 3–4 этажей. Строительство блокированных жилых домов также способствует привлечению сил и средств населения, нуждающегося в улучшении жилищных условий.

Малоэтажная 2–4-этажная застройка повышенной плотности рекомендуется к строительству в разных типологических группах:

- в малых и средних городах на периферийных свободных территориях или на территориях существующей застройки при наличии незастроенных участков, а также в качестве

доуплотняющего элемента в структуре многоэтажной застройки (рис. 2);

- в больших, крупных и крупнейших городах на свободных территориях в сочетании с многоэтажной застройкой, особенно в зонах соприкосновения новой застройки с исторически сложившейся или ценной природной средой, в так называемых контактных зонах;
- в исторических городах при реконструкции и реабилитации (восстановлении) районов исторической застройки, где многоэтажное строительство недопустимо (рис. 3);
- для повышения интенсивности использования территории в районах смешанной городской застройки;
- в специфических природных условиях: жаркий климат, северные районы, сложный рельеф, повышенная сейсмичность, слабые грунты, подрабатываемые территории.



Рис. 1. Номенклатура постановочных блок-секций

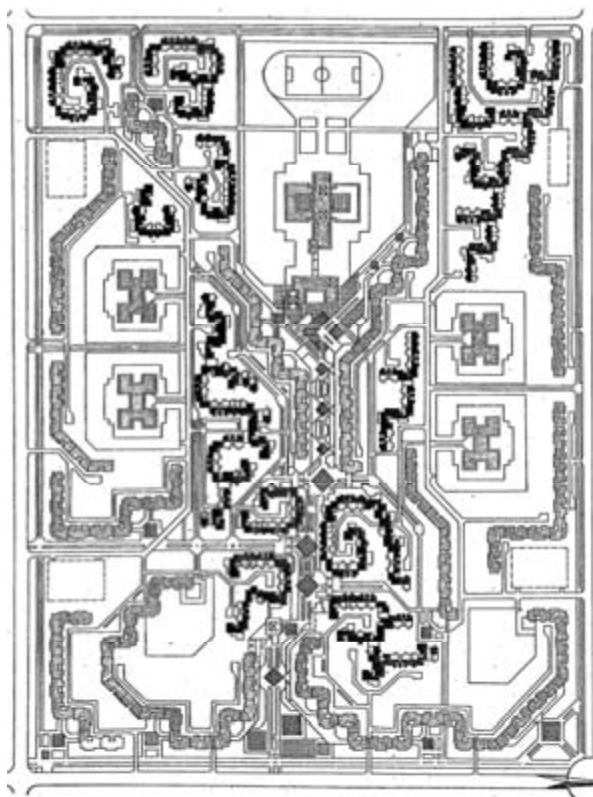


Рис. 2. Использование малоэтажной высокоплотной застройки в жилых районах городов

При разработке генеральных планов городов, проектов детальной планировки (ПДП), проектов застройки рекомендуется выделять для малоэтажной застройки повышенной плотности специальные территории, которые могут быть легко подсоединены к существующим транспортным и инженерным сетям.

Малоэтажная застройка повышенной плотности применяется в городах любой величины, где в сочетании с многоэтажной застройкой она образует неотъемлемую часть жилой среды. При смешанной застройке городских районов целесообразно размещать зоны плотной 2–4-этажной застройки внутри микрорайонов и жилых районов, а фронт улиц и застройку площадей формировать многоэтажными домами.

Малоэтажная застройка повышенной плотности может выполнять роль буферной зоны между промышленными зонами, железнодорожными и автомобильными магистралями и многоэтажными городскими жилыми образованиями.

Малоэтажная застройка повышенной плотности целесообразна в зонах регулирования застройки, вблизи памятников архитектуры и в контактных с ними зонах, а также в особых градостроительных условиях, где строительство многоэтажных зданий недопустимо.

Для сохранения масштаба и характера среды городов России, дошедшей до наших дней в виде целостных памятников архитектуры, кроме ограничения этажности, важна и архитектурная разра-

ботка типа дома – его объемно-планировочной структуры, фасадов, которые вписались бы в историческое и архитектурное окружение.

Здания, проектируемые для районов малоэтажной застройки в исторических городах или в качестве уплотнительной застройки в исторических районах, должны разрабатываться для конкретного города. Переработка типовых проектов для конкретных участков строительства должна осуществляться с учетом исторически сложившейся архитектурно-пространственной среды города. Обогащение силуэта домов, пластики фасадов возможно за счет разнообразно блокируемых компоновочных блок-секций, что способствует архитектурной выразительности застройки. Мелкие компоновочные элементы – вставки, короткие секции, позволяют вписать дома в окружающую среду, разместить их на свободных, даже небольших, участках в реконструируемых районах.

Малоэтажная застройка позволяет создавать небольшие по площади кварталы, которые могут удачно вписаться в существующую застройку, сложившийся исторический центр (города Муром, Ростов Великий, Великий Устюг, Великий Новгород). Широкая номенклатура типов ячеек позволяет выполнить разнообразные в плане жилые группы, то есть вписать здания в застройку, использовать природные данные участка, например рельеф.

Малоэтажная застройка повышенной плотности с успехом может быть использована в застройке пригородных и внутригородских территорий с выраженным рельефом, на так называемых неудобьях. Блокированные дома, приспособленные для строительства на рельефе, формируют каскадную и террасную застройку, интересную по архитектурно-художественному образу, и обеспечивают высокие функциональные качества жилой среды, то есть отвечают самым современным градостроительным, функциональным требованиям и уровню комфорта. В зависимости от крутизны склона возможно применение блокированных жилых домов со сдвижкой компоновочных блок-секций по вертикали и поворотом их по отношению к плоскости склона, организация при этом террас на крышах нижележащих этажей, размещение квартир в 2 и 3 уровнях (рис. 4).

В зависимости от конкретной ситуации, природных условий районов застройки возможны следующие варианты организации транспортного и пешеходного движения:

- *совмещенная сеть*, при которой подъезд к группе жилых домов и к каждому дому осуществляется на расстоянии 5–8 м от входа в дома; эти проезды используются и для пешеходного движения;
- *раздельная сеть*, при которой организуется подъезд к группе жилых домов, а от него к каждому дому ведут пешеходные дорожки длиной не более 50–60 м, проезд по которым к домам не предусматривается;

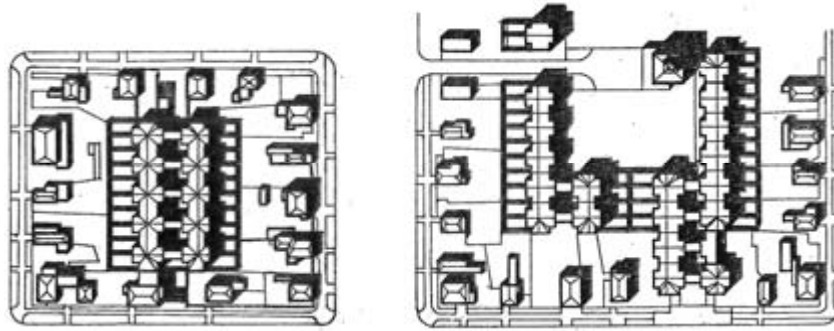


Рис. 3. Малозэтажная застройка в исторических городах

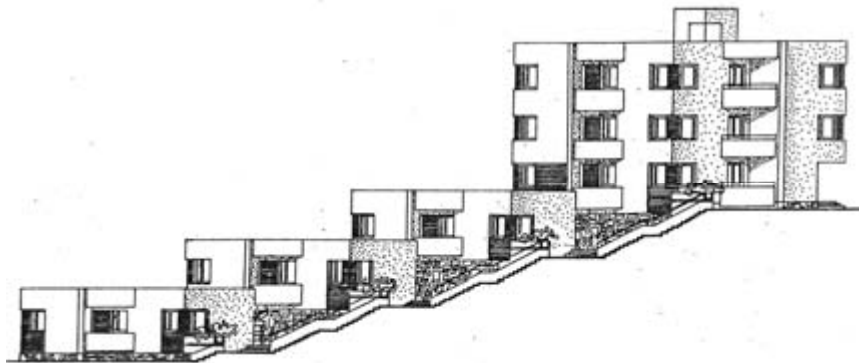


Рис. 4. Вариант расположения компоновочных элементов на рельефе

- *смешанная сеть*, при которой организуется подъезд к группе жилых домов, а от него к каждому дому ведут пешеходные дорожки протяженностью не более 200 м с возможностью проезда по ним.

В проектах застройки кварталов гаражи для индивидуальных автомашин предусматриваются:

- отдельно стоящими на группу жилых домов;
- встроенными в жилые дома или отдельно стоящими на приквартирных участках;
- манежного типа, размещенными на расстоянии 800 м от жилых домов.

Система общественного обслуживания в районах застройки повышенной плотности должна включать укрупненные объекты и сеть небольших по вместимости учреждений и предприятий обслуживания, отдельно стоящих или

встроенных в первые этажи жилых домов. Необходимо использовать в этих кварталах специальные архитектурные решения зданий школ, ДДУ, магазинов, учитывающие масштаб и характер архитектуры малозэтажной застройки. Одним из первостепенных критериев при выборе этажности домов для застройки повышенной плотности должен быть экономический, учитывающий необходимость интенсивного использования территории при наличии кадастровой стоимости земли, что обуславливает:

- экономию городской территории и возможность интенсивного ее использования;
- сокращение протяженности сетей инженерных коммуникаций, дорожной сети;
- сохранение сельскохозяйственных земель, лесных массивов вокруг городов.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Касьянов В. Ф. Реконструкция жилой застройки городов. М.: АСВ, 2002. 536 с.
2. Малоэтажные дома для городской застройки повышенной плотности (рекомендации по проектированию). М.: ЦНИИЭП жилища, 1989. 107 с.
3. Маслов А. В. Новая архитектура в исторической среде. М.: Стройиздат, 1990. 192 с.
4. Махровская А. В. Реконструкция старых жилых районов крупных городов. Л.: Стройиздат, 1986. 336 с.
5. Перспективные типы малоэтажных жилых домов для застройки повышенной плотности. Обзорная информация. М.: ЦНТИ, 1987.
6. Хасиева С. А. Архитектура городской среды. М.: Стройиздат, 2001. 200 с.

**АЛЕКСАНДР ЮРЬЕВИЧ КОСЕНКОВ**

инженер Научно-исследовательского института историко-теоретических проблем народного зодчества, Петрозаводский государственный университет  
*ole-kosenkov@rkmail.ru*

## **КЛАССИФИКАЦИЯ СТЕН В ТРАДИЦИОННОМ ДЕРЕВЯННОМ ЗОДЧЕСТВЕ КАРЕЛИИ И СОПРЕДЕЛЬНЫХ ТЕРРИТОРИЙ РУССКОГО СЕВЕРА**

### **Часть 2\***

В статье впервые представлены структура классификации стеновых конструкций в традиционном деревянном зодчестве Русского Севера и детальная разработка одного из ее «типологических деревьев», посвященного венчатым стенам. Рассмотрены параметры используемого лесоматериала, этапы формирования развитого сруба, приемы, обеспечивающие совместную работу венцов в пределах плоскости стены.

Ключевые слова: Русский Север, деревянное зодчество, классификация стеновых конструкций, срубные стены, эволюция конструктивных приемов

Процесс эволюционных преобразований стеновых срубных конструкций народного деревянного зодчества Русского Севера, гипотетически выявленный в общих чертах на уровне ПОДКЛАССОВ представляемой классификации в первой части настоящей статьи [7], конкретизируется с помощью ТИПОВ – типологических подразделений, иллюстрирующих взаимосвязь закономерностей и тенденций формообразования с их внешними морфологическими проявлениями и, по возможности, с исторически сложившимися в научном сознании представлениями о тех и других. Изначально в качестве ТИПОВ приняты врубки – угловые соединения бревен или производных от них элементов в венцы, по распространенному мнению во многом предопределившие единство и многообразие традиционного деревянного зодчества исследуемого региона к рубежу XIX–XX веков.

В свою очередь, для удобства классифицирования, учитывая многообразие врубок, ТИПЫ

объединены в две ТИПОЛОГИЧЕСКИЕ ГРУППЫ с вариантами: Г1 – угловые соединения архаичных срубов (в рамках ПК1); Г2 – врубки развитых срубов (в рамках ПК2/3).

Первая ТИПОЛОГИЧЕСКАЯ ГРУППА (Г1) описывает способы угловых соединений бревен, лежащих в одном уровне, в венец. В первой части настоящей статьи мы дали определение такой венчатой системе – «протосруб». Умозрительно можно предположить два самых простых способа сопряжения бревен в углах «протосрубов»: «в притык» и накладкой «в полдерева». Факты их применения в чистом виде для возведения стен на Русском Севере нам неизвестны. Зато достоверно можно говорить о существовании модифицированного первого способа, а именно торцевой врезки затесанной вершины одного бревна в боковую поверхность комля сопрягаемого бревна (Т1). Такие соединения называются «в иглу». В простом исполнении «игла» представляет собой торцевую врезку вершины в комель с фикса-

цией последнего вбиваемыми деревянными штырями-упорами (Т1/1). Такой способ возможен только при слабосбежистом лесе или на сооружениях малых размеров. В противном случае, дабы избежать нежелательных щелей между бревнами, дополнительно в комлях каждого бревна вырубали неглубокие округлые выемки, куда укладывались комли вышележащих бревен (Т1/2).

Другой отмеченный способ – соединение накладкой «в полдерева», когда на конце одного из сопрягаемых бревен выбирается выемка в половину его диаметра сверху, а на конце второго бревна – аналогичная выемка снизу. Такой прием встречается, например, в устройстве оснований различных помостов. Однако, как уже отмечалось, стены такой конструкции нами не зафиксированы. В связи с этим очень интересной является находка итальянских археологов в провинции Лукка (Тоскана) в слое, датированном II веком до н. э., «протосруба» аналогичной конструкции. Стены данной постройки сложены из окантованных бревен, соединенных между собой в углах «в полдерева» (рис. 1).



Рис. 1. «Протосруб» с соединением в углах стенообразующих элементов «в полдерева», раскопанный итальянскими археологами в провинции Лукка в Тоскане.

Фото Джаимарко Пьяченти, 2008 год

Переходя к классифицированию угловых соединений развитых срубов, в которых бревна укладываются в венец не в одном уровне, а со смещением, сперва рассмотрим, как решались угловые соединения бревен в протоконструкциях развитых срубов и их переходных формах.

В качестве протоконструкции развитых срубов в первой части настоящей статьи мы рассмотрели устройство стен колхидского жилища. Стены и покрытие данной постройки сложены из бревен по типу «костра». Бревна в углах удерживались без дополнительных креплений только за счет веса вышележащей конструкции и собственного веса (рис. 2). Такой прием получает дальнейшее стадийное развитие в известных нам «режевых» срубах за счет устройства неглубоких выемок с одной или двух (сверху и снизу) сторон бревен в местах

их углового соединения. Дальнейшая модернизация «режевых» срубов способствовала ликвидации зазоров между бревнами (срубы «в погон»). Зазор стали заполнять жердью, врезанной своими торцами в боковые поверхности основных бревен по типу врубки «в иглу». Таким образом, каждое угловое соединение сруба «в погон» представляет собой, как правило, основную верхнюю выемку в бревне и боковую врезку в нем под жердь. Иногда такое соединение дополнительно укрепляется деревянными штырями-упорами (рис. 3). Хозяйственные и промысловые постройки, срубленные «в погон», известны не только на Русском Севере (в Карелии и Новгородской области), но и в Норвегии.

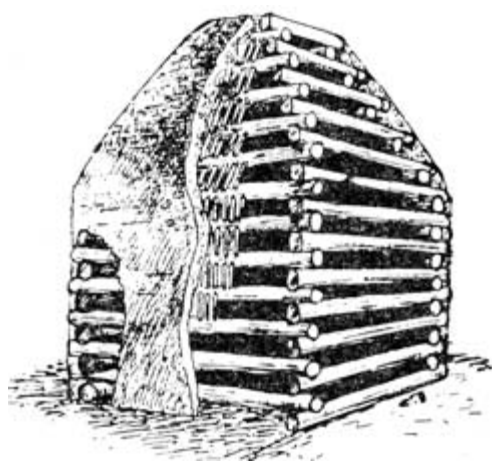


Рис. 2. Гипотетическая реконструкция колхидского жилища, описанного римским архитектором и теоретиком Витрувием (I в. до н. э.) [18; 39]



Рис. 3. Угол сруба промыслово-охотничьего стана на Лешозере в Карелии, сложенного «в погон». По месту использовано дополнительное укрепление углового соединения бревен деревянным штырем-упором [12; 234]

Вторая ГРУППА (Г2) – угловые соединения сплошных (без зазоров) развитых срубов. Данная группа угловых соединений представлена двумя вариантами. Прежде за основу различий между последними мы принимали признак наличия или отсутствия «остатка» [6; 62]. Под остатком углового соединения следует понимать выпуски бревен или производных от них элементов за пределы углов сруба. Другое название таких выпусков – «зауголки» [5; 34]. На первый взгляд признак наличия/отсутствия остатка, или зауголка, может показаться действительно основополагающим для дифференцирования угловых врубок. Однако противоречия, которые возникли при детальном сопоставлении особенностей врубок (например, забегая вперед, отметим врубку «трапециевидная лапа с остатком», при этом заведомо считая все соединения «в лапу» без остатка), привели к пересмотру иерархии признаков. В результате в основе разделения угловых врубок следует учитывать принцип устройства их основного соединительного элемента – выемки: «чашей» (Г2/1) или «углом» (Г2/2), а наличие или отсутствие остатка считать одной из соподчиненных характеристик.

Угловые соединения с выемкой «чашей» (выемка с двумя стенками). Основополагающий различительный признак таких врубок – количество выемок (чаш): одна или две.

Угловые соединения с одной чашей (Т1) имеют два варианта расположения последней: в верхней (Т1/1) или нижней (Т1/2) части бревна. Также следует отметить разнообразие форм выемки. По морфологическому признаку чаши подразделяются на округлые (полные или неполные), трапециевидные и прямоугольные (точнее, чаши с вертикальными стенками). В большинстве случаев форма чаши зависит от обработки конца бревна, иначе говоря, от «сомнения».

Врубки с верхней чашей – наиболее многочисленный тип угловых соединений на Русском Севере, а древнейшая из них – врубка «в обло» (Т1/1(1)). Такое название связано с формой выемки: «облый» значит круглый, округлый, кругловатый [4; 598]. Совершенствование врубки «в обло» путем устройства различных потайных коренных шипов, вырубленных в основании чаши и на ее боковых стенках, стало результатом стремления увеличить жесткость сруба (ДП4). Кроме того, наличие таких шипов («замков») в чашах снижало сквозное продувание швов. Широко распространенный прием устройства коренного шипа в основании чаши называется «в курдюк», «чаша с замком» или «чаша с полочкой» и известен в следующих вариантах: с центральным узким или широким шипом и со смещенным широким шипом (смещен в одну сторону до края чаши). Зачастую в одном срубе применялись как простая рубка «в обло», так и ее модификации.

Для обозначения врубок с округлой верхней выемкой кроме уже упомянутого «в обло» существует множество других названий, например «в круглую зарубу», «в круглую коровку», «в ча-

шу», «в угол», «в простой угол», «в русский угол» и др. Эти названия, характеризующие в общем виде один тип углового соединения, весьма разнородны: одни указывают на технологию производства, другие – на форму выемки, третьи – на этническую принадлежность и т. д.

К врубкам с неполной чашей округлой формы относятся угловые соединения «в крюк» (они же «в присек», «в крюковой угол») (Т1/1(4)). Назначение таких врубок – формировать в интерьере «чистый» (без скругления) угол, образованный сопряжением двух отесанных стен. В плане чаша «крюка» отличается от обычной округлой чаши отсутствием сегмента со стороны внутреннего угла и наличием коренного шипа на боковой ее стенке. Шип одной из своих граней является продолжением отесанной внутренней поверхности бревна. Такое и без того сложное соединение имело ряд модификаций (ДП5): с коротким шипом, упирающимся в плоскость стески сопрягаемого бревна; то же с дополнительным шипом на противоположной стенке чаши; с длинным шипом, врезающимся в отесанную часть сопрягаемого бревна. Такие врубки обеспечивали большую прочность срубу в углах, исключали сквозное продувание швов соединения. Ввиду большей трудоемкости срубить стены «в крюк» стоило в два раза дороже, чем в простое «обло» [2; 5].

Проанализировав материалы, собранные Л. Петтерссоном по заонежским часовням [21], можно констатировать, что в Заонежье уже во второй половине XVIII века рубка часовен «в крюк» была нередким явлением. Применительно к жилью данный тип рубки стен натурно исследовал К. А. Соловьев на территории северной части Московского округа [16; 42–43]. На основании собранных им статистических данных видно, что рубка стен жилых построек «в крюк» получает распространение только с начала XX века и становится престижной в тяготеющих к городу, с хорошим благосостоянием селениях.

Как отмечалось выше, сомление бревна влияет на форму чаши. Так, для врубок с округлыми чашами остатки либо обрабатываются под круг, эллипс и форму сечения яйца, зауженной частью книзу, либо используется природная форма без какой-либо обработки (как правило, для экономии времени и сил при строительстве хозяйственных и промысловых сооружений). В некоторых районах Карелии сомление организует не только торцы бревен, но и их боковые поверхности. На последних по всей высоте стены устраивается строгая вертикальная «черта», фиксирующая общий рубеж начала сомнения всех стенообразующих бревен в конкретном углу.

Врубки с чашей трапециевидной формы (Т1/1(2)) нами зафиксированы преимущественно на территориях с карельским населением и в Ингерманландии. Зачастую исследователи народного зодчества причисляют такие угловые соединения к врубкам «в обло». Однако с точки



зрения этимологии (см. выше) это неверно. С одной стороны, трапезиевидную чашу можно считать упрощением округлой, поскольку в выполнении она легче. С другой стороны, по мнению Э. Алсвика, трапезиевидное соединение работает более эффективно, с течением времени самоуплотняясь подобно клину [1; 155]. Для устройства трапезиевидной чаши известны следующие варианты обработки концов бревен: стеска двух наклонных плоскостей в нижней части бревна в месте соединения или на всю длину остатка и шестигранная отеска («шведский угол»).

Врубки с прямоугольной чашей (Т1/1(3)) в Карелии встречаются относительно редко, в основном на севере края. По литературным данным, они известны в Ленинградской и Новгородской областях, где носят название соединения «в запил(ку)» [19; 231]. Логично предположить, что название чаш в этих соединениях – «запил» – указывает на использование для их устройства поперечных пил, которые появились в арсенале плотников относительно поздно, например, в Карелии начиная с середины XIX века [14; 154]. До этого же любые чаши вырубались исключительно топором, в связи с чем назывались «зарубами». Для врубок с прямоугольными чашами концы укладываемых верхних бревен отесывались или опиливались на два вертикальных канта.

Как уже отмечалось в первой части настоящей статьи, плотность прилегания бревен друг к другу в стене достигалась с помощью устройства в них продольных пазов, особенности которых необходимо учитывать при чистовой рубке чаш. Главным образом это относится к срубам с нижней припазовкой бревен. Итак, для того чтобы обеспечить в угловых соединениях плотное прилегание бревен, в основании чаши вырубается соответствующий «валик» под округлую или угловую (треугольную) форму паза в накрывающем бревне. При использовании верхней припазовки, некоторых вариантов разнопаза и для срубов «в реж» «валик» в основании чаш не устраивается.

Угловые соединения с чашей в нижней части бревна именуются врубками «в охлуп» («в накладку») (Т1/2(1)). По-видимому, такое название связано с тем, что вырубленная в нижней части бревна округлая чаша накрывает, облегает нижележащее сопрягаемое бревно, нахлобучивается на него [3; 68]. Для обеспечения дополнительной жесткости соединения устраивается коренной шип в чаше и соответствующая ему выемка в нижележащем бревне. Врубки «в охлуп» не получили широкого распространения в народном деревянном зодчестве. По литературным источникам известна врубка «в крюк» с нижней чашей [10; 249–250], хотя в натуре такой прием нами не зафиксирован. Придерживаясь предложенных принципов классифицирования, для обозначения такой врубки мы предлагаем название – «крюковой охлуп» (Т1/2(4)).

Существует устойчивое мнение, что соединения «в охлуп» в связи с обратным расположением чаши лучше противостоят атмосферным осадкам, чем, например, врубки «в обло» с традиционной обращенной кверху чашей. Безусловно, логика в этом присутствует. Однако, как показывает реставрационная практика, гниль в верхних чашах встречается редко, несмотря на солидный возраст построек. К недостаткам врубок «в охлуп» многие плотники относят нетехнологичность ее исполнения. Кроме того, если для соединений с верхней чашей свойственно самоуплотнение с течением времени, то усушка сруба «в охлуп» может привести к нарушению его плотности за счет повисания бревен в чашах.

Помимо описанных выше врубок с одной чашей в традиционном деревянном строительстве применялись угловые соединения бревен с двумя чашами. Разделим их на врубки с чашами разной (Т2) и одинаковой (Т3) формы.

В угловых соединениях в первом случае, как правило, устраиваются основная верхняя и дополнительная неглубокая нижняя чаши разной формы. Можно выделить следующие комбинации форм верхней и нижней чаш, соответственно: округлой и прямоугольной (Т2/1(1)), округлой и трапезиевидной (Т2/1(2)), трапезиевидной и прямоугольной (Т2/2(1)). Такие угловые соединения бревен называются врубками «в полоторную чашу». Таким способом рубились стены целиком или в совокупности с морфологически схожими врубками с одной верхней чашей.

Второй способ угловых соединений с двумя равнозначными чашами одинаковой формы – врубки «в охряпку» (они же «в захряб», «в замок», «в рогатый угол», «в собачью шею» и др.) с прямоугольными (Т3/1) или трапезиевидными (Т3/2) выемками. Обычно соединение «в охряпку» в литературе изображают с равными по величине (глубине) чашами, однако в действительности это не всегда так. Использование в строительстве разнокалиберных бревен приводит к серьезным изменениям величины «застоя» (превышение одного бревна по отношению к сопрягаемому бревну в месте их углового соединения), что в свою очередь влечет за собой изменение глубины чаш: верхняя вырубается глубокой, а нижняя – мелкой, или наоборот.

На многих территориях с карельским населением «охряпке» придавался статус традиционного приема возведения рубленых стен [13; 141–142]. Совсем по-другому относились к данному приему русские, которые, по словам В. И. Даля, характеризовали «охряпку» как «скорый, но дурной способ» рубки [4; 774]. В зависимости от назначения постройки концы бревен могли как оставаться без обработки, так и отесываться на два вертикальных канта или даже под овал.

Рассмотрим отмеченную ранее характеристику угловых соединений – наличие или отсутствия остатка (ДП2). Для вышеперечисленных типов угловых соединений развитых срубов

обычно характерно наличие остатка. Поэтому их часто называют общим термином – врубки с остатком. В редких случаях можно встретить такие соединения без остатка, большинство из которых не первоначальные, а образованные опилованием или откалыванием фрагментов остатков. По сути дела, выпуски бревен менее 5 см длиной уже не являются остатками как таковыми и создают фактически чистый угол. Поэтому такие соединения можно считать врубками без остатка. Кроме того, такие короткие выпуски снижают прочность угловой врубки, но, что важно, не меняют принципа ее работы. С конструктивной точки зрения основным назначением остатков является их препятствование скалыванию граней чаш. В среднем применяемая длина остатков колеблется от 15 см до 2/3 или 1 диаметра бревен. Однако встречаются срубные постройки с совсем незначительными остатками. Например, у прируба сеней сяозерской часовни в д. Инжунаволоок остатки составляют около 7 см. На некоторых территориях Русского Севера сохранности остатков уделяли особое внимание. Так, для укрепления остатков, поврежденных во время строительства или эксплуатации срубных построек, на их концы иногда надевали хомуты из нескольких слоев бересты [8]. Известно, что остаток также способствует меньшему промерзанию углов. Кроме того, существенную роль здесь играет технология обработки древесины. До появления в арсенале плотника пилы, чтобы придать постройке репрезентативный вид, остатки уравнивали по длине, зарубая их торцы топором. Использование колунообразного топора способствовало смятию древесных волокон и закрытию пор на торцах бревна, что, безусловно, на какое-то время снижало капиллярное всасывание влаги. Плоский топор и, начиная с середины XIX века, пила не сминали, а перерезали волокна, сохраняя ходы для влаги. Уравнивать торцы бревен с помощью лишь топора – задача трудоемкая. Поэтому избы бедняков, промысловые или временные постройки часто возводились с хаотичными обрубами остатков разной длины. Такой же вид углов, скорее всего, имели архаичные срубы.

До сих пор в Карелии и на Русском Севере в целом врубки с остатком остаются самыми распространенными угловыми соединениями в срубных постройках, а самые популярные из них – врубки «в обло». Причина тому – бесспорные достоинства таких соединений, включающие в первую очередь их прочность и меньшее промерзание в углах. При этом чуть ли не единственным недостатком таких врубок является некоторый перерасход древесины.

Угловые соединения с выемкой «углом» (то есть с одной стенкой) (Г2/2). Угловые соединения с выемкой «углом» – это врубки «в лапу» («в шап», «в брус», «в гладь» и др.). Их применение можно проследить на всех типах построек. Результаты археологических раскопок средневеко-

вого киевского Подола показывают, что эти угловые соединения по древности не уступают врубкам «в обло», но применяются редко [15; 368]. Рубка стен «в лапу» на протяжении обозримой ретроспекции часто применялась в культовом деревянном зодчестве. Например, таким способом иногда рубили алтари. Известны случаи рубки «в лапу» церковей целиком. Так, в порядной записи на построение в 1700 году церковей Екатерины мученицы и Параскевы Пятницы в Вологде находим следующую запись: «А рубить те церкви и олтари въ брусъ, и трапезы въ брусъ же, высотой от полу до подволоки трех сажень...» [17; 281]. Рубка углов «в лапу» в жилых и хозяйственных постройках в крестьянской среде распространяется в XIX–XX веках [3; 70], [16; 42–43], но массового характера не получает. Причины тому могут быть разные. Например, крестьяне и сами плотники считали соединение «в лапу» непрочным. К общеизвестному недостатку такого способа возведения срубов специалисты причисляют неизбежное промерзание углов в зимний период. К достоинству соединений «в лапу» относится максимальное использование длины бревен, и как следствие этого – увеличение площади помещений.

При правильно подобранном лесе выемки «углом» делаются с двух сторон (сверху и снизу бревна) примерно равных размеров, а при использовании разнокалиберных бревен выемки могут сильно отличаться друг от друга по глубине, иногда даже одна из выемок может почти полностью сходиться на нет.

Выемки «углом» на конце бревна формируют основной рабочий элемент соединения, подобный коротенькой консоли, – «лапу». Существуют два основных варианта формы последней: прямоугольная («простая лапа») (Т1) (рис. 4) и трапециевидная («косая лапа») (Т2) (рис. 5). Оба способа применяются как в чистом виде, так и с дополнительными креплениями. Так, в работу соединения прямоугольной «лапы» могут быть включены коренные шипы (Т1/3) и вставные стержневые нагеля (Т1/2). Последние забиваются в предварительно просверленные сквозные отверстия в «лапах». Коренные шипы (ДП6) бывают короткими потайными («лапа с потемкой») или на всю длину соединения. Первые устраиваются в виде «полсковородня» или прямоугольной формы. Вторые же имеют, как правило, только прямоугольную форму и располагаются как с одной нижней стороны (Г-образная или «крюковая лапа») (рис. 6), так и с двух сторон «лапы» (Т-образная «лапа») (рис. 7).

«Крюковая лапа» – прием достаточно распространенный на Русском Севере и за его пределами (в Московской области [16; 42], в Скандинавии и Финляндии [20; 311]). В Карелии он встречается преимущественно на северо-западе края в срубах изб и намогильных домиков или в локальных конструкциях, например на фасадных брусьях и балках балконов.



Рис. 4. Угол избы, рубленный «в простую лапу». Деревня Гужово Каргопольского района Архангельской области. Фото А. Ю. Косенкова, 2009 год



Рис. 6. Угол избы, рубленный «в крюковую лапу». Деревня Юшкозеро Калевальского района Карелии. Фото А. Ю. Косенкова, 2007 год



Рис. 5. Рубленный «в косую лапу» угол сней церкви прп. Александра Свирского в д. Космозеро Медвежьего района Карелии. Фото А. Ю. Косенкова, 2010 год



Рис. 7. Угловая врубка в прямоугольную «лапу» с двумя коренными шипами на всю длину соединения. Владимирская церковь в с. Подпорожье (Жеребцова Гора) Онежского района Архангельской области. Фото из архива сайта «Онега-Онлайн»

Трапецевидная «лапа» за счет скошенных плоскостей, работающих как «замок», является соединением более прочным, чем чистая прямоугольная «лапа». Поэтому дополнительных креплений для нее было выработано меньше, а именно в общем виде всего два варианта прямоугольных коренных шипов (ДП6): потайной короткий и на всю длину соединения. Последний вариант в Карелии нами зафиксирован только на срубках намогильных домиков. Однако это позволяет сделать предположение об использовании данного способа рубки в жилых постройках. В отличие от Карелии, в Швеции и Норвегии достоверно известны жилые постройки, срубленные таким образом (рис. 8).



Рис. 8. Угол жилого дома, рубленный «в косую лапу» с коренным шипом на всю длину соединения. Швеция. Фото Финна Йенсона.

Встречаются срубы, в которых трапецевидная форма «лапы» слабо выражена и местами даже органично переходит в прямоугольную.

Интересный симбиоз угловых соединений зафиксировал Л. Е. Красноречьев [9; 22–23]. Внутри помещения круглые бревна соединяются, как при рубке «в обло», а снаружи – «в лапу». По существу это все-таки соединение «в лапу», а для иллюзии круглых углов в интерьере в соединении с внутренней стороны устраивалась округлая вырубка (Т1/4).

Бытует мнение, что врубки «в лапу» – это соединения «без остатка», поэтому оба термина отождествляются. В действительности не все так од-

нозначно. Среди соединений «в лапу» следует выделять врубки и «с остатком», и «без остатка» (ДП2). Видимо, в силу преобладания последних (их еще называют соединениями «в чистый угол», «в белый угол» и т. д.) сложилось такое мнение. Что же представляет собой «остаток» врубок «в лапу»? Это вынос «лапы» за пределы угла с сохранением ее формы – прямоугольной или трапецевидной (рис. 9). Среди остатков встречаются как намеренно оставленные выпуски, так и образованные в силу небрежности исполнения врубки. Л. Е. Красноречьев называл «лапой с остатком» соединение «в охряпку» [9; 22–23]. Действительно, если сравнивать «простую лапу» с «охряпкой» с прямоугольными чашами, на первый взгляд разница заключается только в наличии/отсутствии остатка. Также можно отметить, что в силу морфологической схожести обе врубки нередко применялись в одном срубе. Однако на основании предложенных принципов классифицирования главное различие этих соединений состоит в устройстве выемок: «углом» или «чашей», поэтому наличие остатка не должно менять характер устройства и работы врубки.



Рис. 9. Рыбный амбар, рубленный в «косую лапу» с остатком. Деревня Чапома Терского района Мурманской области [11; 375]

В настоящей статье мы представили детальное описание двух типологических уровней классификации – ТИПОЛОГИЧЕСКИЕ ГРУППЫ и ТИПЫ. В ходе дальнейших исследований предполагается разработка последующих типологических подразделений: ВИДЫ, описывающие структурно-морфологические особенности стен; ПОДВИДЫ, рассматривающие дифференциации наружных стен; РАЗНОВИДНОСТИ, демонстрирующие приемы устройства функционально-декоративной обшивки.

## ПРИЛОЖЕНИЕ

КЛАССИФИКАЦИЯ ВЕНЧАТЫХ СТЕН  
(ТИПОЛОГИЧЕСКИЕ ГРУППЫ, ТИПЫ)

## ТИПОЛОГИЧЕСКИЕ ГРУППЫ

(по принципу угловых соединений бревен в венцы):

**Г1** – архаичные угловые соединения бревен в «протосрубках»**Г2** – угловые врубки в сплошных развитых срубах:

Г2/1 – угловые соединения бревен с выемкой «чашей»

Г2/2 – угловые соединения бревен с выемкой «углом»

## ТИПЫ

(по устройству угловых соединений наружных стен):

## ТИПЫ для Г1:

**Т1** – угловое соединение с врезкой торца одного бревна в боковую поверхность комля сопрягаемого бревна

Т1/1 – "– с фиксацией комля деревянными штырями-упорами

Т1/2 – "– с устройством в комлевых частях бревен неглубоких выемок

...

## ТИПЫ для Г2/1:

**Т1** – угловое соединение с одной чашей

Т-1 – угловое соединение с чашей, обращенной вверх

Т-2 – то же вниз

Т-/(1) – "– с одной чашей округлой формы

Т-/(2) – то же трапецевидной

Т-/(3) – то же прямоугольной

Т-/(4) – то же с Г-образной в плане чашей (неполной округлой чашей при рубке «в крюк»)

**Т2** – угловое соединение с двумя чашами разной формы – основной верхней и дополнительной нижней «получашей»

Т-1 – "– с основной чашей округлой формы

Т-2 – то же трапецевидной

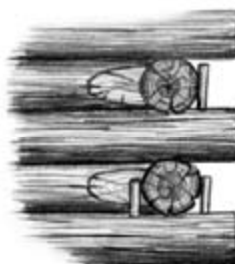
Т-/(1) – угловое соединение с «получашей» прямоугольной формы

Т-/(2) – то же трапецевидной (только для Т2/1)

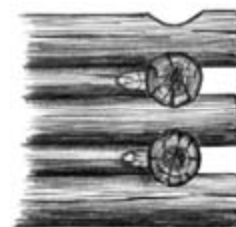
**Т3** – угловое соединение с двумя чашами одинаковой формы

Т-1 – угловое соединение с чашами прямоугольной формы

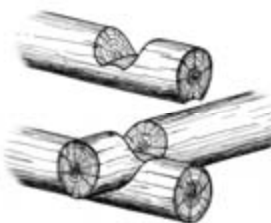
Т-2 – то же трапецевидной

**Г1:**

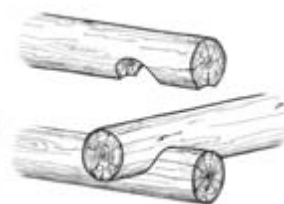
Т1/1 («в иглу»)



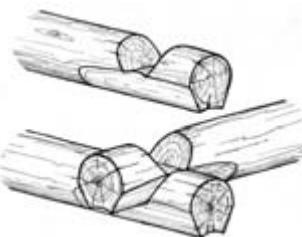
Т1/2 («в иглу»)

**Г2/1:**

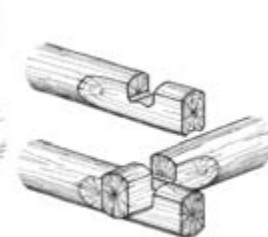
Т1/1(1) («в обло»)



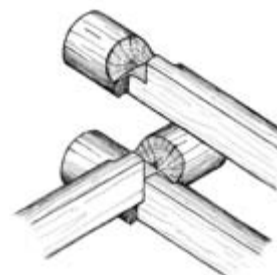
Т1/2(1) («в охлуп»)



Т1/1(2)



Т1/1(3) («в запил»)



Т1/1(4) («в крюк»)

**ТИПЫ для Г2/2:**

**Т1** – угловое соединение в прямоугольную «лапу»

**Т2** – –"– в трапецевидную «лапу»

Т-1 – –"– без дополнительных креплений

Т-2 – –"– с креплением цилиндрическими нагелями

Т-3 – то же с коренными шипами

Т-4 – –"– с округлыми зарубками с внутренней стороны угла для имитации в интерьере соединения «в обло» (только для Т1)

**ДОПОЛНИТЕЛЬНЫЕ ПРИЗНАКИ**

для всех ТИПОВ:

**Т:ДП1** – Характер перехода от необработанной поверхности бревна к вертикальным плоскостям при отеске на два канта концов бревен:

ДП1/1 – угловое соединение без перехода

ДП1/2 – –"– с переходом в виде плавной стески (подтески)

ДП1/3 – то же полуовальной подтески

ДП1/4 – то же фрезерной подтески

ДП1/5 – то же прямой подрезки

ДП1/6 – то же наклонной (неорганизованной) сегментарной подрезки

ДП1/7 – то же вертикальной сегментарной подрезки

...

**Т:ДП2** – Характеристика остатков:

ДП2/1 – угловые врубки без остатка

ДП2/2 – угловые врубки с остатком

ДП-/(1) – –"– с удлиненным остатком (> 1 диаметра бревен)

ДП-/(2) – –"– с остатком нормальной длины (от 15 см до 1 диаметра бревна)

ДП-/(3) – –"– с укороченным остатком (менее 15 см)

ДП-/(-)[1] – остатки равной длины

ДП-/(-)[2] – остатки различной длины

ДП-/(-)[<1> – остатки неторцованные (хаотичные обрубы)

ДП-/(-)[<2> – остатки зарубленные

ДП-/(-)[<3> – остатки запиленные

**Т:ДП3** – Характеристика обработки концов бревен (для типов Г2/1):

ДП3/1 – концы бревен без обработки

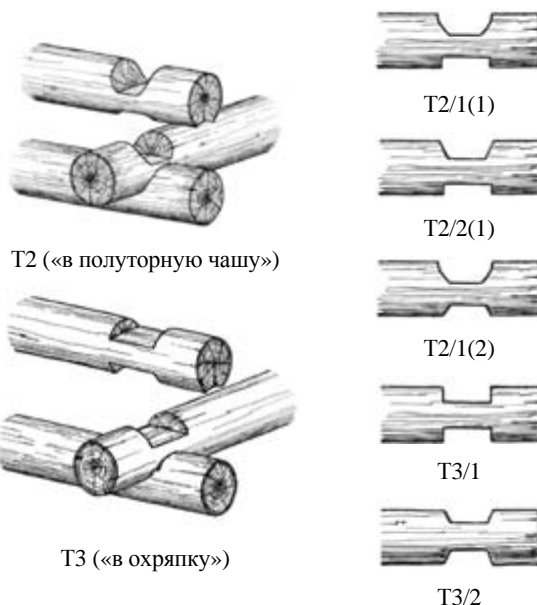
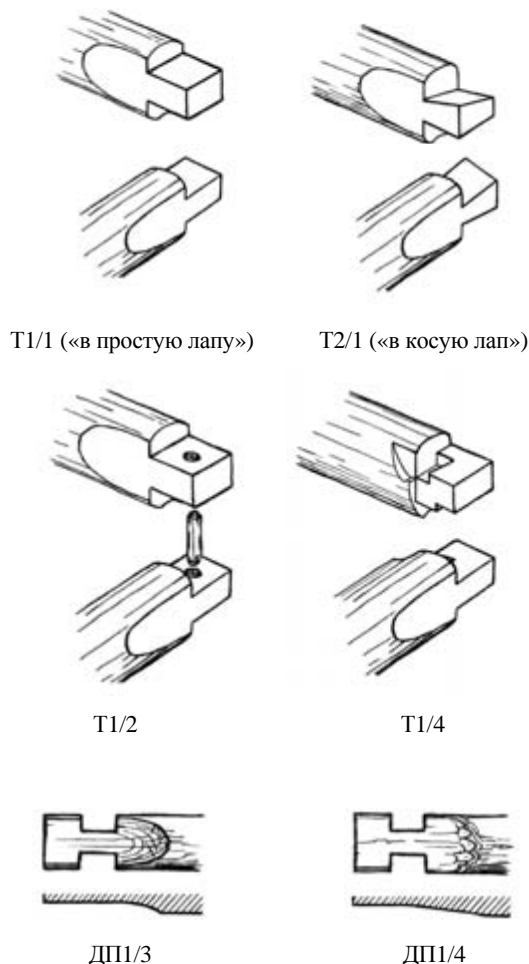
ДП3/2 – с обработкой конца бревен только в месте углового соединения

ДП3/2(1) – –"– с отеской на два вертикальных канта

ДП3/2(2) – –"– с отеской на две скошенные плоскости в нижней части бревна

ДП3/3 – концы бревен полностью обработанные

ДП3/3(1) – –"– с отеской на два вертикальных канта

**Г2/2:**

ДПЗ/З(2) – "– с отеской на две скошенные плоскости в нижней части бревна  
 ДПЗ/З(3) – "– с обработкой под круг  
 ДПЗ/З(4) – "– с обработкой под эллипс  
 ДПЗ/З(5) – "– с обработкой под форму сечения яйца (зауженной частью книзу)  
 ДПЗ/З(6) – "– с обработкой под шестигранник  
 ДПЗ/З(-)[1] – "– с обработкой концов бревен без «черты», фиксирующей начало сомления  
 ДПЗ/З(-)[2] – то же с «чертой», фиксирующей начало сомления  
 ДПЗ/З(-)[-]<1> – "– во всех углах и перерубах лицевого (главного) фасада  
 ДПЗ/З(-)[-]<2> – то же двух смежных фасадов  
 ДПЗ/З(-)[-]<3> – то же трех смежных фасадов  
 ...

**Т:ДП4** – Устройство дополнительных креплений в чашах при рубке «в обло» (для Г2/1, Т1/1(1)):

ДП4/1 – угловое соединение без дополнительных креплений  
 ДП4/2 – "– с креплением в виде узкого продольного коренного шипа по центру основания чаши  
 ДП4/3 – то же в виде широкого продольного коренного шипа  
 ДП4/4 – то же со смещением широкого шипа к краю чаши  
 ДП4/5 – угловое соединение с креплением в виде коренного шипа на стенке чаши  
 ...

**Т:ДП5** – Устройство неполных чаш при рубке «в крюк» (для Г2/1, Т1/1(4)):

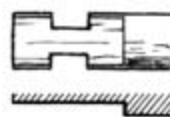
ДП5/1 – неполная чаша с коротким шипом, упирающимся в плоскость стески сопрягаемого бревна  
 ДП5/2 – то же с дополнительным шипом на противоположной стенке чаши  
 ДП5/3 – неполная чаша с длинным шипом, врезающимся в отесанную часть сопрягаемого бревна  
 ...

**Т:ДП6** – Характеристика коренных шипов (для типов Г2/2):

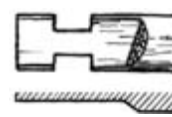
ДП6/1 – угловое соединение с коротким прямоугольным шипом  
 ДП6/2 – "– с коротким шипом в виде «полусковородня» (только для Т1)  
 ДП6/3 – "– с длинным прямоугольным шипом на всю длину соединения  
 ДП6/4 – "– с длинными прямоугольными шипами с двух сторон (только для Т1)  
 ...

**Т:ДП7** – Конкретизация врубки внутренних стен и перерубов в наружные стены (для типов Г2/2):

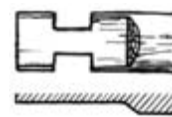
ДП7/1 – сквозные врубки  
 ДП7/-(1) – "– «в ласточкин хвост»,



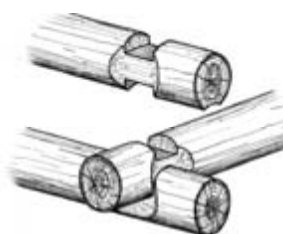
ДП1/5



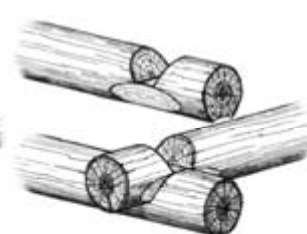
ДП1/6



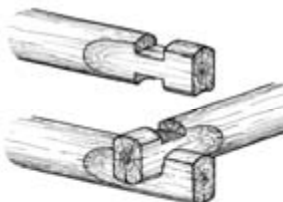
ДП1/7



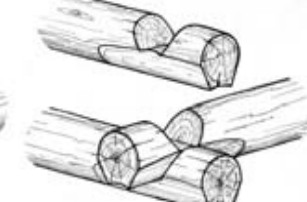
ДПЗ/2(1)



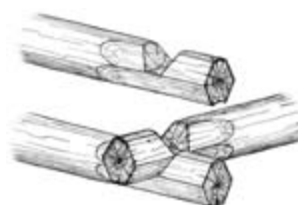
ДПЗ/2(2)



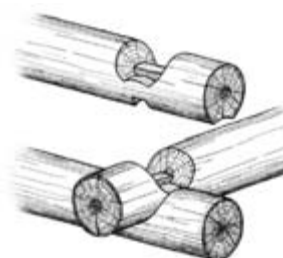
ДПЗ/3(1)



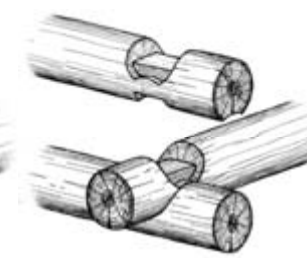
ДПЗ/3(2)



ДПЗ/3(6)



ДП4/2



ДП4/3

ДП7/-(2) – "– в виде прямоугольной врезки с коренными шипами на бревнах наружных стен,

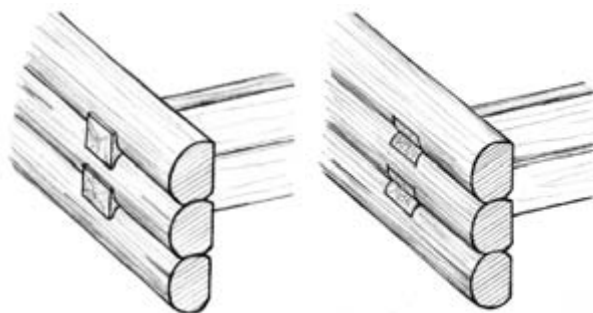
ДП7/-(1)[1] – "– с вертикальными торцами врезаемых бревен,

ДП7/-(2)[2] – "– с торцами, скругленными заподлицо с поверхностью бревен наружных стен

ДП7/2 – потайные врубки

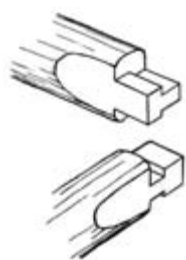
ДП7/2(1) – "– «в ласточкин хвост»

...

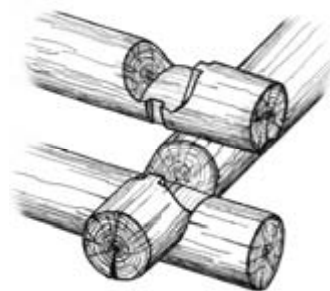


ДП7/1(-)[1]

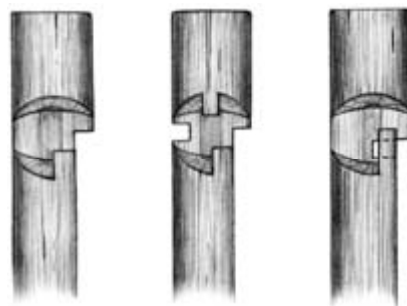
ДП7/1(-)[2]



ДП6/4



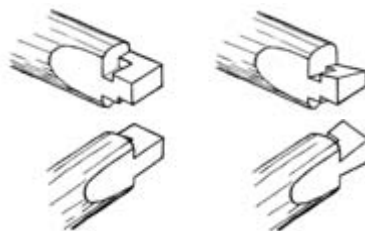
ДП4/5



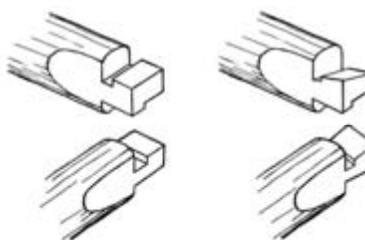
ДП5/1

ДП5/2

ДП5/3



ДП6/1



ДП6/3

\*Окончание статьи, начало в журнале «Ученые записки Петрозаводского государственного университета», серия «Естественные и технические науки». Март, 2010. № 2(107). С. 13–24.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Алсвик Э. Срубные постройки в России и Норвегии // Актуальные проблемы исследования и спасения уникальных памятников деревянного зодчества в России: Международный симпозиум. Доклады. СПб., 1999.
2. Артамонов М. И. Постройки Краснохолмского района // Верхне-Волжская этнологическая экспедиция. Крестьянские постройки Ярославско-Тверского края. Л., 1926.
3. Бломквист Е. Э. Крестьянские постройки русских, украинцев и белорусов // Восточно-славянский этнографический сборник. М., 1956. С. 5–458.
4. Даль В. И. Толковый словарь живого великорусского языка. Т. II. М.: Русский язык, 1981.



5. Едемский М. Б. О крестьянских постройках на Севере России // Живая старина. Вып. 1–2. СПб., 1913. С. 25–116.
6. Косенков А. Ю. К вопросу о систематизации стеновых срубных конструкций в традиционном деревянном зодчестве Русского Севера // НТЖ «Вестник БГТУ им. В. Г. Шухова». 2009. № 4. С. 56–63.
7. Косенков А. Ю. Классификация стен в традиционном деревянном зодчестве Карелии и сопредельных территорий Русского Севера. Ч. 1 // Ученые записки Петрозаводского государственного университета. Сер. «Естественные и технические науки». 2010. № 2(107). С. 13–24.
8. Косенков А. Ю. Традиционные срубные постройки в Кенозерье и Лекшмозерье (по материалам полевых обследований 2008–2009 гг.) // Кенозерские чтения-2009: Материалы IV Всероссийской научной конференции (в печати).
9. Красноречьев Л. Е. Исследование и реставрация памятников деревянного зодчества. По опыту работ в Новгородской области. СПб.: Дмитрий Буланин, 1999. 60 с.
10. Кузнецов А. В. Архитектурные конструкции. М.: Академия архитектуры СССР, 1940. 744 с.
11. Медведев П. П. Деревянное гражданское зодчество Беломорского Поморья (опыт системного анализа с применением ЭВМ): Дис. ... канд. архитектуры. Т. 3. Петрозаводск, 1985. с.
12. Ополовников А. В. Русское деревянное зодчество. М.: Искусство, 1983. 288 с.
13. Орфинский В. П. Загадки «домиков мертвых» // Памятники культуры и мировоззрение: Атеистические очерки. Петрозаводск: Карелия, 1985. С. 129–143.
14. Орфинский В. П., Яскеляйнен А. Т. Хронологическая атрибуция сооружений деревянного культового зодчества Карелии // Народное зодчество: Межвуз. сб. Петрозаводск: Изд-во ПетрГУ, 1999. С. 147–160.
15. Сагайдак М. А. Гражданские постройки средневекового Киева X–XI вв. // Народное зодчество: Межвуз. сб. Петрозаводск: Изд-во ПетрГУ, 2007. С. 363–390.
16. Соловьев К. А. Жилище крестьян Дмитровского края (Северная часть Московского округа). Дмитров: Издание музея Дмитровского края, 1930. 189 с.
17. Суворов Н. И. Порядная запись на построение деревянной Пятницкой церкви в г. Вологде, 1700 года // Известия Императорского Русского археологического общества. Т. 3(III). Вып. 4. СПб., 1861. Стлб. 280–284.
18. Сумбадзе Л. З. Архитектура грузинского народного жилища дарбази. Тбилиси: Мецниереба, 1984. 454 с.
19. Сыщиков А. Д. Лексика крестьянского деревянного строительства. СПб.: Филологический факультет СПбГУ, 2006. 292 с.
20. Kolehmainen A., Laine V. A. Suomalainen talonpoikaistalo. Helsinki: Otava, 1980. 459 s.
21. Pettressen L. Äänisniemen kirkollinen puuarkkitehtuuri. Helsinki, 1950. 343 s.

УДК 537.52; 538.9; 539.26

**ВЛАДИМИР ИВАНОВИЧ ПОДГОРНЫЙ**

кандидат физико-математических наук, доцент кафедры геологии и геофизики физико-технического факультета ПетрГУ  
*podgvlad@psu.karelia.ru*

**СЕРГЕЙ ДМИТРИЕВИЧ КУЩ**

научный сотрудник Института проблем химической физики РАН (г. Черноголовка)  
*ksd@icp.ac.ru*

**АЛЕКСАНДР НИКОЛАЕВИЧ ЯКОВЛЕВ**

кандидат физико-математических наук, доцент кафедры общей физики физико-технического факультета ПетрГУ  
*yakov@psu.karelia.ru*

**БОРИС ЗАЛМАНОВИЧ БЕЛАШЕВ**

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

**О НЕКОТОРЫХ РЕЗУЛЬТАТАХ ИССЛЕДОВАНИЯ СИНТЕЗА ФУЛЛЕРЕНОВ И НАНОТРУБОК В УСЛОВИЯХ АРГОНОВОГО ДУГОВОГО РАЗРЯДА**

В статье обсуждены режимы работы аргоновой и гелиевой дуг и некоторые их особенности. Установлено, что внутренняя часть аргонового депозита содержит углеродные стержни, распадающиеся в отдельных случаях на пучки многостенных углеродных нанотрубок. Показано, что аргоновая сажа содержит не менее 4 структурных фаз. Обнаружено, что основными газами, выделяющимися при нагреве аргоновой черни, являются пары воды, кислород и оксиды углерода.

Ключевые слова: дуговой разряд, графит, катодный депозит, фуллереновая чернь, многостенные нанотрубки

**ВВЕДЕНИЕ**

Одним из самых распространенных методов получения фуллеренов является использование дугового разряда с графитовыми электродами. В качестве буферного газа обычно применяют гелий. Аргон является более распространенным и более дешевым газом, чем гелий; кроме того, он характеризуется меньшим потенциалом ионизации и, следовательно, меньшей мощностью дуги. Однако выход фуллеренов при использовании аргона как буферного газа не превышает 2 %, тогда как в случае гелиевой дуги эта величина значительно больше (до 15 %) [3].

В наших работах разработан и освоен метод получения наноструктурных материалов с помощью аргонового дугового разряда [10, 11]. В настоящей работе сообщается о некоторых результатах этого исследования.

**ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА И МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЙ**

Экспериментальная установка состояла из вакуумного колпака, водоохлаждаемой разрядной

камеры цилиндрической формы, системы напуска газа и источника напряжения 60 В [9], [10], [11]. В качестве испаряемого анода использовались графитовые стержни марки ОСЧ 7–3 диаметром 6 мм. Камера размещалась внутри вакуумного колпака. Через смотровые окна, имеющиеся на колпаке, можно было визуально контролировать процессы поджига и горения дуги [9].

Объектом исследования служили в основном продукты испарения, образующиеся на стенках разрядной камеры и колпака, на электродах и других деталях внутри разрядной камеры и колпака. Морфология этих веществ исследовалась с помощью растрового электронного микроскопа РЭМ-200, просвечивающего электронного микроскопа ЭМ-125 и оптических микроскопов. Элементный анализ производился с помощью электронного растрового микроанализатора Vega-Teskan и элементного анализатора CHNSO Vario Micro cube (фирма Elementar Analysensysteme GmbH, ФРГ). Термогравиметрические (ТГ) и масс-спектрометрические исследования продуктов испарения выполнялись на термоанализаторе STA-409 PC Luxx, совмещенном с масс-спектрометром QMS-403 C (фирма NETZSCH,

ФРГ). Все значения массовых чисел  $m/e$  указаны в атомных единицах массы.

Рентгеноструктурные исследования производились на рентгеновском дифрактометре ДРОН-4 с использованием  $\text{Cr } K_\alpha$ -излучения.

Фуллерены из фуллереносодержащих саж многократно (не менее 5 раз) экстрагировали свежими порциями толуола (или о-ксилола) при комнатной температуре. Полученные экстракты анализировали спектрофотометром марки Spectord M80 в видимой области в диапазоне длин волн 14000–35000  $\text{см}^{-1}$ . В качестве стандартного образца сравнения использовали экстракт, включающий, по данным высокоэффективной жидкостной хроматографии:  $\text{C}_{60}$  – 74,11,  $\text{C}_{70}$  – 23,02,  $\text{C}_{76+}$  – 2,41,  $\text{C}_{60}\text{O}$  – 0,41 масс. % [6].

Нерастворимые углеродные остатки после экстракции, называемые далее как соответствующая чернь, отделяли от жидкого экстракта фуллеренов фильтрованием, промывали ацетоном и сушили в вакууме при температуре  $T = 420 \text{ K}$  в течение примерно 6 часов.

Величина выхода экстракта определялась двумя способами. В первом (весовом) методе измерялось изменение массы сажи до и после экстракции из нее фуллеренов. Во втором методе производилось сравнение оптической плотности окрашенного настоя с плотностями набора эталонных настоев, содержащих различные количества экстракта и одинаковое количество растворителя [10].

## 2. РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

### 2.1. Режимы работы аргоновой дуги

В процессе исследований было установлено, что аргоновая дуга может гореть в трех различных режимах.

1. Непосредственно после нагрева и замыкания электродов при межэлектродном зазоре  $d = 0,1\text{--}0,5 \text{ мм}$  реализовывался режим термокаатода. В этом случае дуга стабильно горела при почти постоянном напряжении  $U = 22\text{--}23 \text{ В}$ , токе разряда  $I = 60\text{--}80 \text{ А}$  и неизменной величине  $d$ . Причем в процессе даже длительного горения в этом режиме никакой регулировки зазора не требовалось, поскольку высота образующегося на катоде нароста из материала анода почти в точности равнялась длине фрагмента анодного стержня, испаренного в этих условиях.

Во время формирования нароста на водоохлаждаемых стенках камеры осаждалось некоторое количество сажи. Среднюю скорость  $v$  образования этой сажи можно определить по соотношению  $v = \Delta m / \Delta t$ , ( $\Delta m$  – масса сажи, образовавшейся на стенках разрядной камеры,  $\Delta t$  – длительность горения дуги). На рис. 1 приведена зависимость  $v$  от давления аргона  $p$  при постоянном токе разряда  $I = 50 \text{ А}$ .

Как видно, максимальное значение  $v$  не превышает 17 мг/мин и с увеличением давления аргона скорость образования сажи постепенно уменьшается почти до 6 мг/мин.

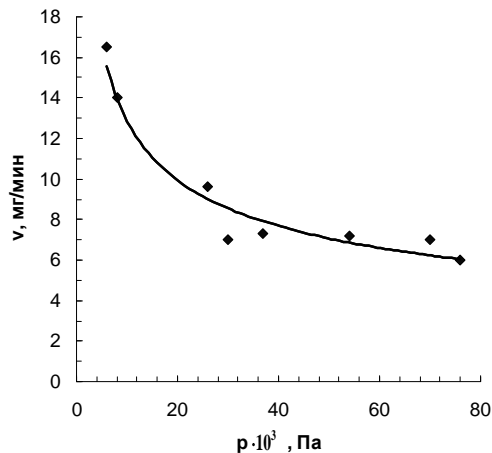


Рис. 1. Зависимость скорости образования сажи  $v$  от давления аргона

Зависимость выхода фуллеренов  $w$  от давления аргона в этом режиме носит немонокотный характер, максимальный выход не превышает 4 масс. % (рис. 2).

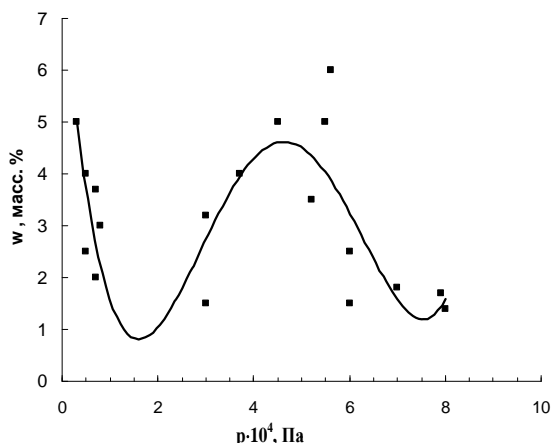


Рис. 2. Зависимость выхода фуллеренов  $w$  от давления аргона

Средняя скорость роста высоты катодного депозита (а следовательно, и скорость испарения анода) в этом режиме находилась в диапазоне 1,2–1,5 мм/мин.

2. С увеличением межэлектродного зазора до  $d = 2\text{--}3 \text{ мм}$  и токах разряда  $I \geq 150 \text{ А}$  визуально наблюдался переход дуги в режим с катодным пятном. При этом на катоде появлялось ярко светящееся пятно, произвольным образом перемещающееся по поверхности. Выход фуллеренов в этом режиме составлял менее 1 масс. % практически при всех исследованных давлениях аргона [10].

Такой низкий уровень выхода фуллеренов в этом режиме можно объяснить эмиссией из катодного пятна ионов углерода с аномально высокой энергией [7], которые способны разрушить образующиеся линейные и кольцевые структуры из атомов углерода в зоне их формирования [1].

В случае гелиевой дуги высокая подвижность атомов и ионов этого газа приводит к бы-

струму уменьшению энергии этих аномальных ионов. В аргоновой дуге скорость процесса передачи тепла к водоохлаждаемой стенке намного меньше и энергию аномальных ионов не удается погасить до зоны формирования фуллеренов. По этой причине образование фуллеренов в плазме дуги с катодным пятном менее вероятно, чем в плазме дуги с термокатодом. К тому же большие токи разряда могут приводить к увеличению скорости разлета углеродной плазмы [1].

3. В отдельных случаях при параметрах разряда и величине зазора, характерных для режима с термокатодом, в наших исследованиях наблюдался режим разряда с аномально высокой скоростью испарения анодного стержня (от 2,5 до 4 мм/мин). При этом в области стыка анодного стержня с катодным депозитом визуально отмечено появление небольшого ярко светящегося сгустка, вращающегося по окружности вокруг анодного стержня. По-видимому, этот режим является комбинацией режима дуги с термокатодом и режима с анодным пятном, перемещающимся по кромке анодного стержня. Причины появления подобного режима нами не были установлены.

Ожидалось, что более высокие скорости испарения анода в этом режиме могут способствовать более высокому выходу фуллеренов. Однако, как показали наши исследования, выход фуллеренов не превышал 4 масс. %, то есть он был таким же, как в режиме с термокатодом, где скорость испарения анода была почти в 2 раза меньше. Вместе с тем в катодном депозите, образующемся в этом режиме, были замечены следы фуллерита. В качестве иллюстрации на рис. 3 показан фрагмент дифрактограммы этого образования.

Наблюдаемые на дифрактограмме небольшие пики (111), (220) и (311) по своему местоположению совпадают с соответствующими рефлексами ГЦК структуры фуллерита  $C_{60}$ . Таким образом, при высокой скорости испарения анода часть молекул фуллеренов может замуровываться в депозите.

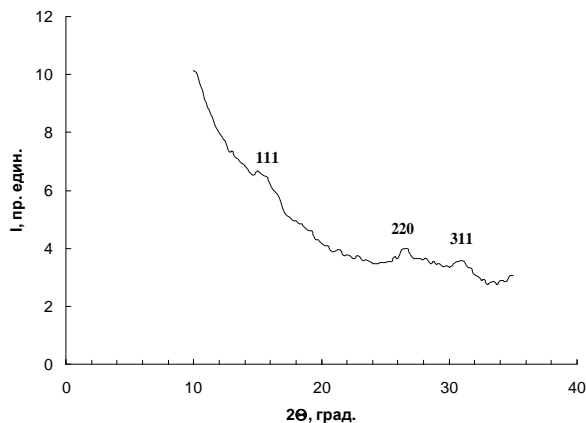


Рис. 3. Фрагмент дифрактограммы катодного депозита

## 2.2. Сравнение с гелиевой дугой

С целью сравнения в качестве буферного газа в нашей конструкции был использован гелий при сходных параметрах разряда. Было обнаружено, что напряжение горения гелиевой дуги при прочих равных условиях почти в 1,5 раза больше ( $U = 30\text{--}32\text{ В}$ ) по причине, очевидно, более высокого потенциала ионизации атомов гелия ( $\phi = 24,58\text{ эВ}$ ) по сравнению с аргоном ( $\phi = 15,76\text{ эВ}$ ) и, соответственно, мощность этой дуги также намного выше. Скорость испарения анода в этих условиях составляла 4–6 мм/мин и намного превышала скорость роста высоты депозита. Поэтому в этом режиме приходилось непрерывно поддерживать величину межэлектродного расстояния. Выход фуллеренов в этих условиях составлял в среднем около 12 масс. %, что находится в хорошем согласии с литературными данными [3]. В наших условиях гелиевая дуга работала в основном только в режиме термокатода. Переход в режим с катодным пятном происходил при несколько большем, чем в случае аргона, значении межэлектродного расстояния:  $d \geq 4\text{ мм}$ . Кроме того, в случае гелиевой дуги выход фуллеренов в определенных пределах слабо зависел от величины межэлектродного зазора и, следовательно, от режима работы дуги. Очевидно, что решающее значение для образования фуллеренов имеют более высокие энергии электронов, ионов и атомов в углеродно-гелиевой плазме по сравнению с их значениями в углеродно-аргоновой плазме при одинаковой концентрации атомов углерода.

На рис. 4 представлены рентгеновские дифрактограммы сажи, полученной в гелиевой (кривая 1) и аргоновой (кривая 2) дугах при давлении газа  $p = 8 \cdot 10^3\text{ Па}$ .

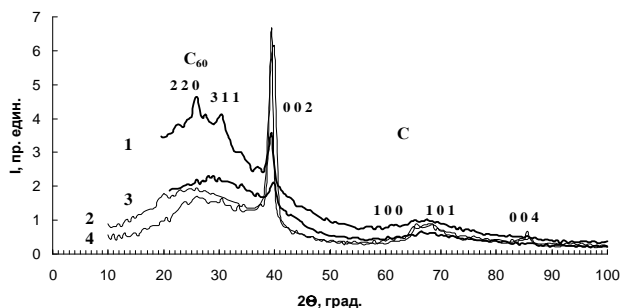


Рис. 4. Дифрактограммы сажи при  $p = 8 \cdot 10^3\text{ Па}$ : 1 – от разряда в He, 2 – от разряда в Ar, 3 – после экстракции фуллеренов (He разряд), 4 – после экстракции фуллеренов (Ar разряд)

Представленные данные иллюстрируют значительную разницу в составе саж от этих дуг. На кривой 1 на фоне обширного аморфного гало, простирающегося в диапазоне углов  $2\theta$  от  $20^\circ$  до  $55^\circ$ , отчетливо различаются рефлексы (220) и (311) ГЦК структуры фуллерита  $C_{60}$  и междусеточный рефлекс графита (002). Другие рефлексы графита на этой кривой практически не видны. На кривой 2 высота аморфного гало значительно

меньше (почти в 2 раза) и рефлекссы фуллерита  $C_{60}$  на ней едва заметны. При этом высота графитового пика (002), наоборот, почти в 2 раза больше, чем в гелиевой саже, и более отчетливо проявляются рефлекссы (100), (101) и (004) гексагонального графита.

Разница в высотах максимумов (220), (311) на кривых 1 и 2, по-видимому, обусловлена тем, что размер кристаллитов  $C_{60}$ , образующихся на пути пролета молекул от дуги до водоохлаждаемой стенки в гелиевой дуге, по меньшей мере существенно больше, чем их размер в условиях аргоновой дуги.

После экстракции фуллеренов из гелиевой сажи (кривая 3) фуллеритовые пики исчезают, а аморфное гало по-прежнему присутствует на дифрактограмме, хотя оно меньше по высоте. Другими словами, нерастворимому остатку сажи после экстракции фуллеренов (или фуллереновой черни), не окрашивающей растворитель в характерный при наличии фуллеренов красно-коричневый цвет [2], свойственно аморфное гало на рентгеновской дифрактограмме в области углов, характерных для фуллеренов.

Дифрактограмма аргоновой сажи после экстракции фуллеренов (кривая 4) практически не отличается от исходной кривой 2. Этот результат можно объяснить, по-видимому, незначительностью количества удаляемого вещества после этого процесса (в данном случае – порядка 1 масс. %). Полученные данные означают, что в исходной саже присутствует не менее трех различных структурных фаз: частицы фуллерита, частицы сажи графитоподобной структуры и, возможно, аморфный углерод. Две последние фазы, очевидно, не способны растворяться в органических растворителях.

Следует заметить, что только в случае аргоновой дуги в саже обнаруживается также небольшое количество частиц субмиллиметровых размеров, представляющих собой конгломерат спеченных микроскопических сфероидальных объектов. Образование зародышей и рост этих частиц можно наблюдать визуально на стыке кромки анода и депозита, то есть, вообще говоря, в периферийной части дугового разряда.

На рис. 5 приведена микрофотография фрагмента наиболее типичных таких частиц. Как видно, эти частицы состоят из большого количества сфероидальных спеченных более мелких (порядка нескольких микрон) объектов. Их химический состав следующий: 96 масс. % углерода и 4 масс. % кислорода. Наличие кислорода обусловлено, очевидно, его адсорбцией из атмосферного воздуха на поверхности этих объектов. Дифрактограмма этих частиц включает только рефлекссы (002), (100), (101) и (004) гексагонального графита и не содержит гало при малых углах (рис. 6).

Итак, в аргоновой дуге при испарении анода синтезируется еще одна (четвертая) фаза, наиболее близкая по структуре к графиту.

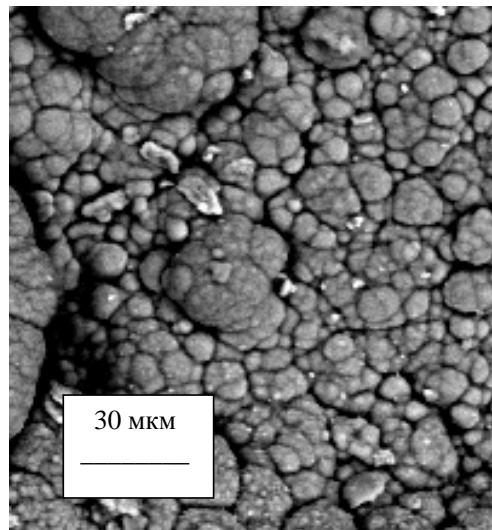


Рис. 5. Микрофотография углеродных частиц из сажи

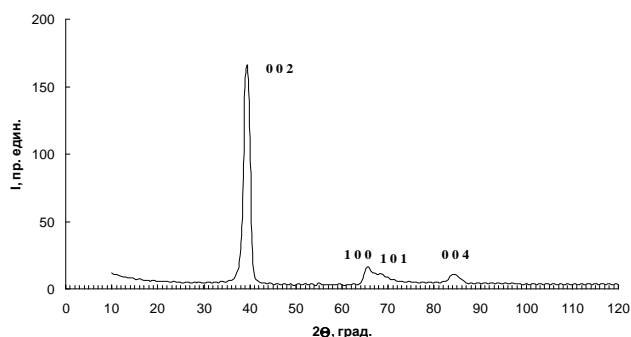


Рис. 6. Рентгеновская дифрактограмма углеродных частиц

Для полноты картины следует упомянуть еще об одной компоненте, иногда наблюдаемой в саже при синтезе фуллеренов в аргоновом и гелиевом дуговых разрядах, а именно о волокнообразных объектах длиной порядка нескольких миллиметров и толщиной в десяток микрон [13]. По внешнему виду эти образования напоминают волокна целлюлозы [5]. С помощью электронного микроанализатора был исследован химический состав более чем в 40 точках обнаруженных объектов. Их основными компонентами являлись углерод и кислород. Относительное содержание этих элементов в волокнах изменялось в таких пределах: для углерода – от 45 до 85 ат. %, для кислорода – от 45 до 15 ат. %.

Нам не удалось установить природу этих объектов и их происхождение. В этой связи мы не можем отнести их к отдельной фазе.

### 2.3. Исследования аргоновой и гелиевой черней

Исследования аргоновой и гелиевой черней методами термогравиметрии (ТГ) и дифференциальной сканирующей калориметрии (ДСК) в основном подтверждают полученные данные.

На рис. 7 приведены окислительные термограммы различных черней. Как видно, температура начала окисления, характеризующая реакционную способность, повышается в ряду: ге-

лиевая обычная (полученная при стандартном межэлектродном расстоянии  $d = 1$  мм [6]), аргоновая, гелиевая специальная (полученная при  $d = 10$  мм [6]) черни.

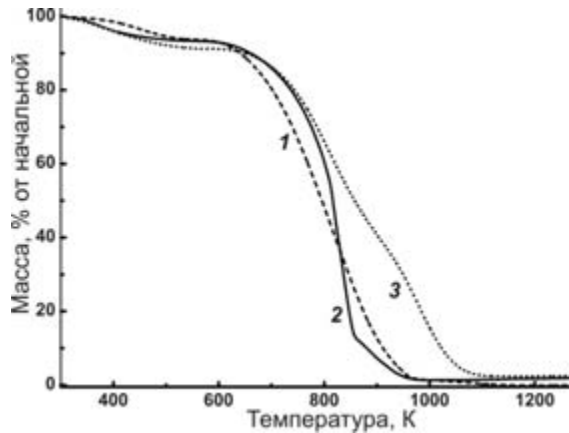


Рис. 7. Окислительные термограммы черни: 1 – гелиевая специальная ( $d = 10$  мм [6]), 2 – аргоновая, 3 – гелиевая обычная ( $d = 1$  мм [6])

Аргоновая чернь хотя и окисляется легче обычной, содержит после хранения на воздухе меньше адсорбированного кислорода (1,9 масс. %) по сравнению с обычной гелиевой чернью (7,1 % масс. [6]). Элементный состав аргоновой черни приведен в таблице.

Элементный состав аргоновой черни

Образец	Содержание, масс. %			
	C	H	Ar	O
1	97,26	0,909	0,08	1,57
2	96,55	0,997	0,56	1,578
3	97,89	0,704	0,35	1,639

Следует заметить, что более высокая реакционная способность аргоновой черни по сравнению с гелиевой обычной, вообще говоря, не согласуется с наличием в ее составе достаточно большого количества частиц графита, о чем свидетельствует максимум (002) на рис. 3. Известно, что графит характеризуется низкой реакционной способностью и плохо окисляется. С этих позиций обнаруженный факт не находит объяснения и требует дополнительного изучения и интерпретации.

Масс-спектральный состав аргоновой черни иллюстрирует рис. 8. Как видно, при термодесорбции выделяются кислород ( $m/e$  32), вода ( $m/e$  17, 18, 1) и оксиды углерода: CO ( $m/e$  28), CO<sub>2</sub> ( $m/e$  44), причем выделение этих компонент происходит при близких температурах, что указывает, по-видимому, на смешанную (физическую и химическую) сорбцию кислорода и воды из атмосферы черню.

Заметим, что аналогичные результаты ранее были получены для гелиевых специальной и обычной черней [6].

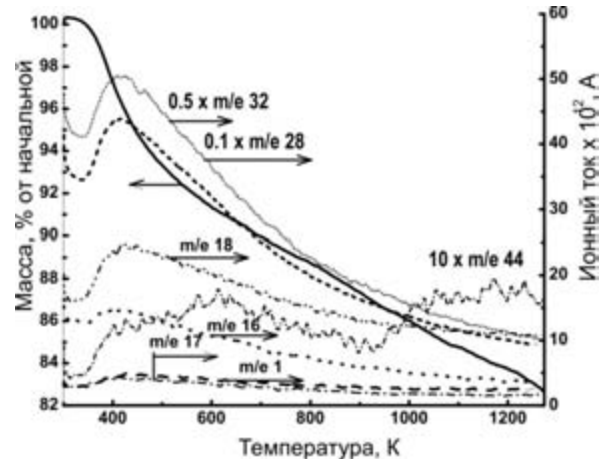


Рис. 8. Термограмма в токе аргона аргоновой черни с масс-спектральным анализом газовых продуктов

На рис. 9 приведены типичные кривые ТГ и ДСК аргоновой черни при давлениях аргона  $p = 3 \cdot 10^4$  Па (кривые 1, 2) и при  $p = 5 \cdot 10^4$  Па (кривые 3, 4). Анализ кривой 3 показывает, что ее можно представить как суперпозицию (сумму) трех тепловых экзоэффектов с максимумами при 750, 860 и 900 К. Тепловой эффект  $Q$  этих реакций можно оценить как площадь участка от оси абсцисс до соответствующей части кривой 3. Согласно этой процедуре были получены следующие значения  $Q$ : 12,3, 4,9 и  $1,8 \cdot 10^6$  Дж/кг.

Кривая 4 на этом же рис. 9 аппроксимируется как сумма четырех тепловых экзоэффектов при 730 К ( $Q = 17,6 \cdot 10^6$  Дж/кг), 840 К ( $Q = 4,3 \cdot 10^6$  Дж/кг), 910 К ( $Q = 2,4 \cdot 10^6$  Дж/кг) и 1005 К ( $Q = 0,6 \cdot 10^6$  Дж/кг). Можно предположить, что самые низкотемпературные тепловые эффекты (при 750 и 730 К) относятся к окислению аморфного углерода, более высокотемпературные (860 и 840 К) – к окислению графитизированных частиц, и самые высокотемпературные (900, 910 и 1005 К) – к окислению графитовых частиц. Величины тепловых эффектов этих реакций, вообще говоря, подтверждают высказанное предположение.

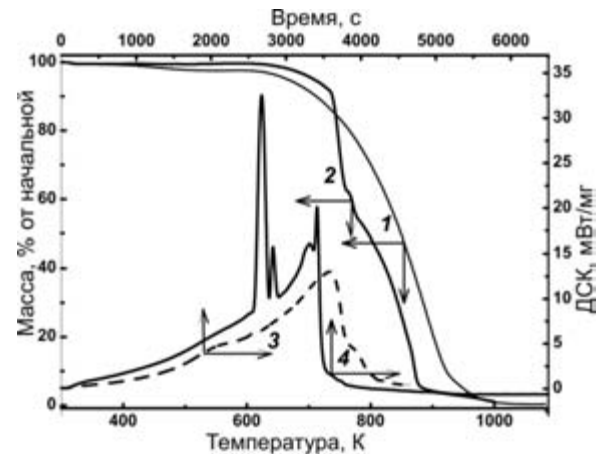


Рис. 9. Окислительные термограммы (1, 2) и кривые ДСК (3, 4) аргоновой черни: 1, 3 –  $p = 3 \cdot 10^4$  Па, 2, 4 –  $p = 5 \cdot 10^4$  Па

Далее полученная в наших исследованиях аргоновая чернь размещалась в различных местах внутри разрядной камеры и производилось исследование ее влияния на выход фуллеренов.

При размещении примерно 1 грамма черни внутри отверстий, просверленных в катодной пластинке или в графитовом держателе анода, выход фуллеренов составлял ту же величину, что и при отсутствии черни, то есть выход был около 3,5–4 масс. %. Затем около 10 граммов черни размещалось в графитовой кювете на дне разрядной камеры на расстоянии около 2 см от анода. При такой конструкции по мере сгорания анода происходил не только постепенный излучательный нагрев всей черни (до температуры  $T \geq 1800$  К) по всей длине кюветы, но и бомбардировка ее поверхности атомами и ионами углеродно-аргоновой плазмы. После испытаний в этих условиях наблюдалось даже уменьшение выхода экстракта примерно до 1 масс. %. Мы полагаем, что в этих условиях в процессе нагрева из черни выделяются адсорбированные газы (в частности, кислород), которые и способствуют уменьшению выхода фуллеренов.

Многократный прогрев этой черни в условиях дугового разряда постепенно приводил к увеличению выхода до прежнего уровня. При этом на всех этапах в самой черни не было обнаружено появление молекул фуллеренов.

На рис. 10 показаны рентгеновские дифрактограммы этой черни на разных этапах ее обработки в вышеописанных условиях дугового разряда. Видно, что с увеличением времени обработки черни в дуге происходит уменьшение уровня гало в области малых углов, стабилизирующееся, в конечном счете, при некотором постоянном значении, не зависящем от времени обработки. При этом высоты максимумов, близких к рефлексам графита (002), (100), (101), (004), практически не изменяются.

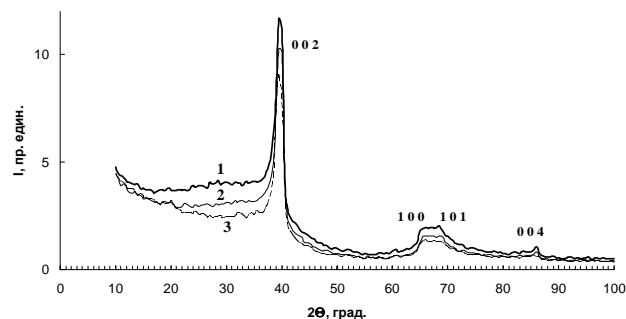


Рис. 10. Рентгеновские дифрактограммы аргоновой черни на разных этапах плазменной обработки:  
1 — в исходном состоянии, 2 — после однократной обработки,  
3 — после пятикратной обработки в дуге

Полученные данные указывают на то, что наблюдаемый достаточно высокий уровень рассеяния в области углов  $2\theta$  до  $40^\circ$  на дифрактограмме черни (см. кривые 3, 4 рис. 4 и 10) обусловлен в основном рассеянием излучения на

углеродных слабоупорядоченных структурах, возможно, частично спеченных. Такими структурами могут быть графитизированные частицы.

#### 2.4. Исследования катодного депозита

В аргоновой дуге при всех исследованных давлениях аргона на поверхности катода напротив анода наблюдалось формирование катодного депозита в виде стержня цилиндрической формы. Средняя скорость роста высоты этого образования составляла до 1,5 мм/мин. Его удельный вес, определенный по отношению массы образца к его геометрическому объему, равнялся примерно  $1,2 \cdot 10^3$  кг/м<sup>3</sup>. Это значение практически совпадает с плотностью углеродного депозита, полученного в работе [4] в схожих условиях. Визуально цилиндр-нарос представлял собой пористое образование из спекшихся частиц серого цвета. Максимально возможная длина выращенного цилиндра составляла 130 мм.

На рис. 11 представлена фотография двух депозитов, полученных в аргоновой дуге. Как видно, длина этих образований превышает 70 мм, а их диаметр близок к диаметру исходного графитового стержня.

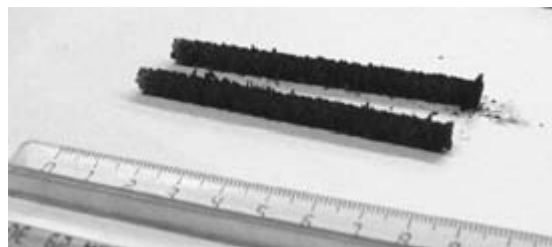


Рис. 11. Фотография катодных депозитов, полученных в аргоновой дуге

На рис. 12 представлены микрофотографии разломов двух наростов-депозитов, полученных при давлениях аргона  $p = 3 \cdot 10^4$  Па (а) и  $p = 1 \cdot 10^4$  Па (б). Как видно, эти образования состоят из наружной квазичилиндрической оболочки и своеобразной внутренней части. В большинстве случаев последняя представляет собой пучок почти параллельных тонких углеродных стержней диаметром около 40 мкм. Все эти стержни направлены вдоль оси симметрии нароста-депозита [12], [14].

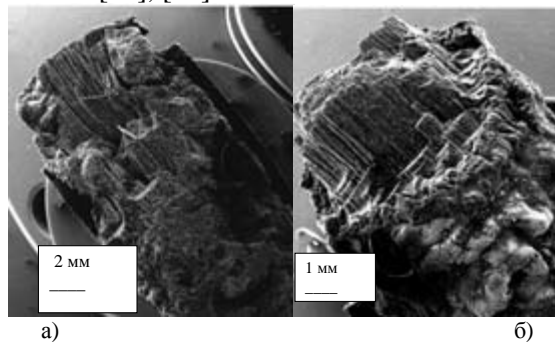


Рис. 12. Микрофотографии продольных разломов катодных депозитов: а)  $p = 3 \cdot 10^4$  Па, б)  $p = 1 \cdot 10^4$  Па

В наших исследованиях было установлено, что морфология и внутренняя структура наростов-депозитов в значительной степени зависела от давления  $p$  аргона в разряде. При величинах  $p \geq 3 \cdot 10^4$  Па формировались наросты с рыхлой внутренней структурой и, следовательно, большой внутренней поверхностью. В частности, в них внутренние стержни легко отделялись друг от друга (см. рис. 12а). Причем в этом случае дуга горела очень стабильно, без замыканий, при неизменной величине  $d$ . Если же давление  $p$  находилось в диапазоне  $(8 \cdot 10^3 - 2 \cdot 10^4)$  Па, то наружная форма нароста заметно отличалась от цилиндрической, на ней обнаруживались большие выступы и впадины; при этом внутренняя структура нароста была намного более плотной, и смежные углеродные стержни в ней практически смыкались без зазора (рис. 12б). В этом режиме неоднократно отмечались случаи замыкания электродов из-за неравномерного роста толщины нароста-депозита по сечению.

В процессе электронно-микроскопических исследований депозитов было установлено, что при давлениях аргона  $p \leq 3 \cdot 10^4$  Па внутренние стержни состоят из мелких сфероидальных образований и содержат достаточно небольшое количество многостенных нанотрубок [10]. В случае более высоких давлений аргона ( $p \geq 5 \cdot 10^4$  Па) при определенных условиях образовывались стержни, которые обладали повышенной механической прочностью на излом и которые при механическом сдавливании расщеплялись на более тонкие (диаметром порядка 1 мкм) и короткие (длиной около 3–5 мм) объекты, которые, в свою очередь, распадалась на еще более тонкие образования. Сложную внутреннюю структуру этих стержней иллюстрирует рис. 13. Именно такие стержни содержали наибольшее количество многостенных нанотрубок по всей их длине. В условиях дугового разряда эти нанотрубки, по-видимому, соединялись друг с другом частицами аморфного углерода, формируя тем самым более толстые образования, видимые на рис. 13.

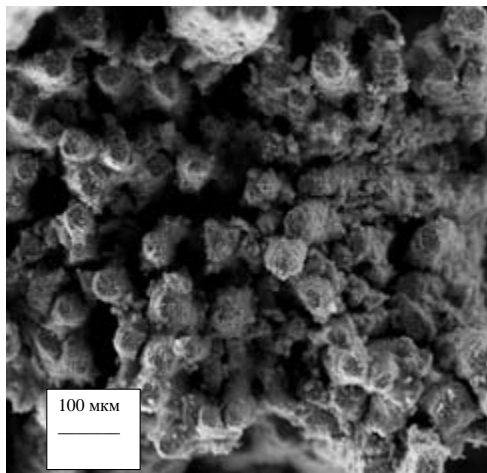
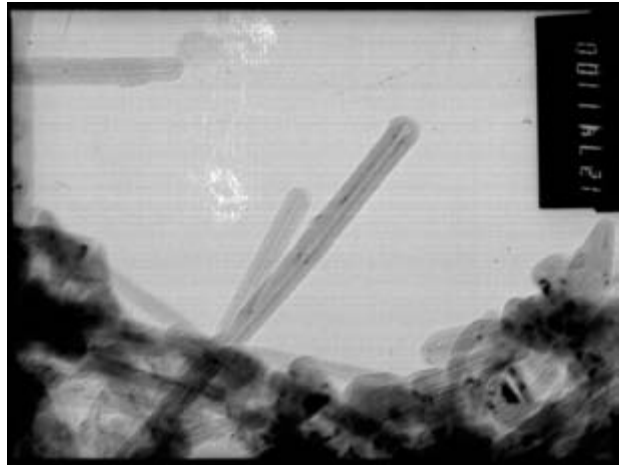
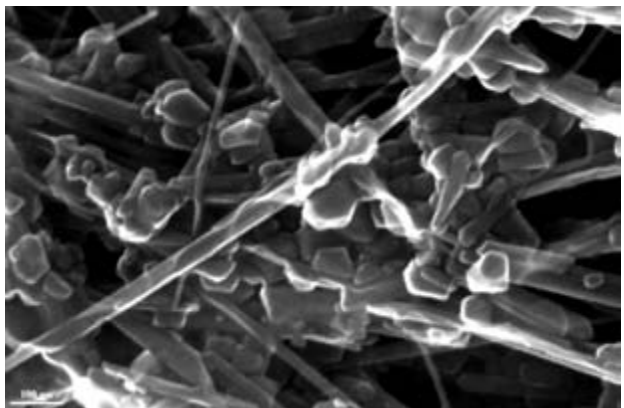


Рис. 13. Микрофотография поперечного разлома катодного депозита  $p = 5 \cdot 10^4$  Па



а



б

Рис. 14. Микрофотография одного из стержней внутренней части депозита, полученная с помощью просвечивающего электронного микроскопа

На рис. 14 представлена микрофотография одного из стержней, полученная на просвечивающем электронном микроскопе. Объект для наблюдения получен методом угольной реплики. В ряде случаев вместе с угольной репликой с поверхности образца отделялись малые фрагменты, так называемые извлечения. На представленном изображении отчетливо различаются нанообъекты в виде трубок, внешний диаметр которых составляет порядка 30 нм, а внутренний – 10 нм. Эти объекты являются, очевидно, многостенными углеродными нанотрубками. Кроме прямолинейных нанотрубок, хорошо различимых в центральной части этой фотографии, в нижней части можно различить также несколько изогнутых нанотрубок. Мы полагаем, что эти нанотрубки в процессе синтеза навивались вокруг центральной оси стержня.

Как следует из рис. 14, плотность нанотрубок в данном извлечении достаточно высокая. По нашим предварительным оценкам, их количество может достигать 40 масс. %.

Полученные результаты указывают на то, что при определенных условиях углеродный пар в



плазме обладает тенденцией к формированию волокнообразных структур на катоде в достаточно широком диапазоне поперечных размеров от нано- до микроструктур. Можно предположить, что эта тенденция реализуется в основном только при достаточно высоких давлениях аргона, то есть в условиях наиболее интенсивного охлаждения углеродных атомов и комплексов буферным газом.

Некоторые из полученных депозитов использовались вместо графитового анода. Было обнаружено, что в этом случае внутренняя структура вновь образовавшегося катодного депозита снова приобретает волокнообразную микроструктуру, но нанотрубок в его составе не обнаруживается. На стенках камеры в этих условиях образуется фуллеренсодержащая сажа с максимальным выходом экстракта около 2 масс. % [9].

Нами были проведены достаточно обширные рентгеноструктурные исследования катодных депозитов-наросов, полученных при различных давлениях аргона. Практически на всех дифрактограммах наблюдались только достаточно широкие максимумы, совпадающие по своему местоположению с рефлексами (002), (100), (101) и (004) гексагонального графита [12], [14]. Таким образом, в состав депозита могут входить графитоподобные частицы, аморфный углерод и многостенные угле-

родные нанотрубки, которые, как известно [8], характеризуются в основном рефлексами графита.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Исследован фазовый состав продуктов испарения аргонового и гелиевого дуговых разрядов. При использовании аргонового депозита в качестве анода выход экстракта фуллеренов несколько меньше, чем при использовании графитового стержня. Внутренняя часть этого депозита содержит углеродные стержни толщиной около 40 мкм, распадающиеся при механическом воздействии на более тонкие и короткие объекты. Предполагается, что этими объектами являются пучки многостенных углеродных нанотрубок. Основными газами, выделяющимися при нагреве аргоновой черни, являются пары воды, кислород и оксиды углерода. По своей сорбционной способности (содержанию кислорода) различные черни располагаются в ряд: гелиевая специальная, аргоновая, гелиевая обычная. Аргоновая сажа содержит не менее 4 структурных фаз: аморфный углерод, фуллерены, графитизированные частицы и частицы графита. Размещение аргоновой черни в разрядной камере не приводит к увеличению выхода фуллеренов, то есть фуллерены из аргоновой черни получить не удастся.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Алексеев Н. И., Дюжев Г. А. Кинетика углеродных кластеров в дуговом разряде от атомов к фуллеренам // ЖТФ. 2002. Т. 72. № 5. С. 121–129.
2. Алешина Л. А., Подгорный В. И., Стефанович Г. Б. и др. Исследование распыления шунгитов с помощью дугового разряда // ЖТФ. 2004. Т. 74. № 9. С. 43–46.
3. Афанасьев Д. А., Богданов А. А., Дюжев Г. А. и др. Образование фуллеренов в дуговом разряде // ЖТФ. 1997. Т. 67. № 2. С. 125–128.
4. Золотухин И. В., Соколов Ю. В., Иевлев В. П. Структура, внутреннее трение и модуль упругости фрактального углеродного депозита // ФТТ. 1998. Т. 40. № 3. С. 584–586.
5. Йиргенсонс Б. Природные органические макромолекулы: Пер. с англ. М.: Мир, 1965. 554 с.
6. Куш С. Д., Куюнко Н. С. Фуллереновая чернь: строение, свойства и каталитические приложения // Альтернативная энергетика и экология. 2008. № 2. С. 59–65.
7. Месяц Г. А., Баренгольц С. А. Механизм генерации аномальных ионов вакуумной дуги // УФН. 2002. Т. 172. № 10. С. 1113–1130.
8. Мурадян В. Е., Полякова Н. В., Шульга Ю. М. и др. Синтез и исследование фторированных углеродных многостенных нанотрубок // IX Междунар. конференция «Водородное материаловедение и химия углеродных наноматериалов». Севастополь: АНЕУ, 2005. С. 386–387.
9. Подгорный В. И. Некоторые результаты исследования распыления шунгита и графита в дуговом разряде // Ученые записки Петрозаводского государственного университета. Сер. «Естественные и технические науки». 2008. № 4. С. 100–106.
10. Подгорный В. И., Белашев Б. З., Киселев В. П. и др. Исследование морфологии, элементного состава и структуры продуктов распыления дугового разряда в аргоне // Материаловедение. 2007. № 9. С. 37–44.
11. Подгорный В. И., Яковлев А. Н. Некоторые особенности получения фуллеренов с помощью дугового разряда в аргоне // Материаловедение. 2005. № 9. С. 42–47.
12. Подгорный В. И., Яковлев А. Н., Белашев Б. З. О некоторых особенностях получения фуллеритов в аргоновой дуге // IX Междунар. конференция «Водородное материаловедение и химия углеродных наноматериалов». Севастополь: АНЕУ, 2005. С. 396–397.
13. Podgornyi V. I., Kiselev V. P., Yakovlev A. N. et al. On possible synthesis of some organic microstructures in a process of fullerene fabrication by means of argon arc discharge // Carbon Nanomaterials in Clean Energy Hydrogen Systems / Ed. by B. Baronowski et al. Springer Science, 2008. P. 307–312.
14. Podgorny V. I., Yakovlev A. N., Belashev B. Z. On some special features of carbon nanostructure fabrication in argon arc discharge // Hydrogen Materials Science and Chemistry of Carbon Nanomaterials / Ed. by T. N. Veziroglu et al. Springer Science, 2007. P. 745–752.

УДК 539.24/.27; 539.216

**АНАТОЛИЙ ДМИТРИЕВИЧ ФОФАНОВ**

доктор физико-математических наук, профессор кафедры физики твердого тела физико-технического факультета, Петрозаводский государственный университет  
*afofanov@psu.karelia.ru*

**ДЕНИС ВЛАДИМИРОВИЧ ЛОБОВ**

кандидат физико-математических наук, доцент кафедры физики твердого тела физико-технического факультета, Петрозаводский государственный университет  
*ldenis@psu.karelia.ru*

**ДМИТРИЙ ВЛАДИМИРОВИЧ ЛОГИНОВ**

аспирант кафедры физики твердого тела физико-технического факультета, Петрозаводский государственный университет  
*logindm@mail.ru*

## ДИАГНОСТИКА ПОРОШКОВЫХ МАТЕРИАЛОВ МЕТОДАМИ РЕНТГЕНОГРАФИИ

В статье дан краткий обзор методов исследования порошковых материалов на основе дифракции рентгеновского излучения. Обсуждены теоретические основы методов, их возможности и ограничения. Особое внимание уделено возможности получения информации о структурном состоянии поликристаллического материала с ультрамелкодисперсными частицами.

Ключевые слова: поликристаллы, рентгеноструктурный анализ, фазовый анализ, метод Ритвельда, «рентгеноаморфная» картина рассеяния

### 1. ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ДИФРАКЦИОННЫХ МЕТОДОВ ИССЛЕДОВАНИЯ ПОРОШКОВЫХ МАТЕРИАЛОВ

Согласно классификации, приведенной в [9], регулярными совокупностями атомов являются:

- кристаллический блок с правильной периодической структурой;
- поликристалл, состоящий из хаотически ориентированных кристаллических блоков (монокристаллов);
- мозаичный кристалл, состоящий из блоков, разделенных границами (средний угол мозаичности составляет доли градуса);
- идеальный кристалл.

Различие между блоками мозаики и идеальным кристаллом чисто количественное. В зависимости от способа получения размеры блоков мозаичного кристалла могут меняться от  $10^{-5}$  см до 1 мм, тогда как линейные размеры идеального кристалла могут достигать 5–10 см. В дифракционных экспериментах граница между кристаллическим блоком и идеальным кристаллом опреде-

ляется экстинкционной длиной, показывающей, при каких размерах блоков необходимо учитывать взаимодействие рассеянных волн с первичной волной в кристалле. Экстинкционная длина определяется сечением рассеяния, то есть степенью взаимодействия излучения с веществом. Для рентгеновского излучения эта длина порядка  $10^{-4}$  см.

В динамической теории рассеяния рентгеновских лучей идеальным кристаллом [24] экстинкционная длина (глубина) зависит и от рассеивающей способности системы плоскостей, находящихся в отражающем положении, и от степени отклонения данных плоскостей от строго брэгговского положения:

$$\tau = \tau_0 / \sqrt{1 + y^2}, \quad (1)$$

$$\text{где } \tau_0 = \frac{\pi m c^2 \cos \theta V_{\text{cel}}}{e^2 P \lambda |F_h|}$$

(здесь  $P$  – поляризационный фактор, равный 1 или  $|\cos \theta|$ ), а параметр  $y$  пропорционален величине  $\Delta \theta = \theta - \theta_B$ .

Если в реальном поликристалле размер кристаллитов в определенном направлении (вдоль нормали к отражающей плоскости) соизмерим по величине с экстинкционной длиной для этой плоскости, то кинематическая теория рассеяния уже неприменима для описания наблюдаемой дифракционной картины. Поэтому всегда необходим предварительный анализ применимости кинематического приближения теории рассеяния для исследуемого поликристаллического объекта во всем интервале экспериментальных углов рассеяния. Критерием может служить система неравенств

$$D_{\text{окр}}(hkl) \ll \tau_0(hkl), \quad (2)$$

где  $D_{\text{окр}}$  – размер области когерентного рассеяния в направлении, перпендикулярном к плоскости (hkl). Если неравенства (2) нарушаются, то применение той или иной процедуры обработки экспериментального дифракционного спектра, основанной на кинематической теории рассеяния, становится проблематичным и к результатам обработки необходимо относиться критически, так как есть вероятность систематических ошибок в интерпретации данных.

Логическая схема рентгенографического исследования материалов выглядит следующим образом:

- на изучаемый объект падает пучок рентгеновских лучей, характеризующийся определенным спектральным составом, конечными размерами фокуса трубки, сходимостями (вертикальной и горизонтальной);
- в результате взаимодействия излучения с веществом формируется дифракционная картина, которая фиксируется системой регистрации. Дифракционная картина содержит информацию о первичном пучке, структуре исследуемого образца и условиях проведения эксперимента (в частности, об аппаратных искажениях);
- «расшифровка» картины рассеяния излучения с целью получения информации об исследуемом объекте.

Так как основная цель большинства дифракционных экспериментов – получить максимум информации об изучаемом образце, информация о первичном пучке и условиях проведения эксперимента является «лишней», искажающей информацию об объекте. Расшифровка наблюдаемой в эксперименте дифракционной картины должна обязательно включать в себя процедуры корректного учета условий проведения дифрактометрического эксперимента и устранения аппаратных искажений. Реализация данных процедур основывается на ряде модельных представлений, которые наиболее подробно и систематически для «стандартных» условий эксперимента по исследованию поликристаллических и монокристаллических объектов описаны в [30], [31].

Процесс взаимодействия излучения с веществом достаточно сложен и многообразен. По-

этому при описании его необходимо абстрагироваться от несущественных в данных условиях эксперимента деталей, ограничиваясь только когерентным рассеянием. В теории когерентного рассеяния рентгеновского излучения используются идеализированные (модельные) представления, как о самом объекте, так и о характере взаимодействия излучения с ним [3], [5], [7], [8], [9], [12], [13], [27], [35].

На первый взгляд, модельные представления об объекте рентгенографических исследований очень разнообразны, но фактически круг моделей сильно ограничен построенными к настоящему времени вариантами теории рассеяния рентгеновских лучей материалами в различных состояниях. Умозрительные же модели атомной структуры исследуемого объекта, не подкрепленные количественными расчетами дифракционной картины в рамках теории рассеяния, адекватной используемой модели материала, существенно снижают надежность получаемой из эксперимента информации, а в некоторых случаях приводят к ошибочным выводам.

В теории рассеяния рентгеновских лучей в зависимости в основном от агрегатного состояния вещества используют следующие группы моделей для некристаллических объектов [5], [7], [27]:

- скопление невзаимодействующих рассеивающих центров (газ);
- скопление многоатомных молекул с жесткими внутримолекулярными связями (газы и жидкости);
- скопление многоатомных систем, состоящих из групп, внутри которых связи не являются жесткими, а корреляция между группами отсутствует или незначительна (жидкости и аморфные материалы).

Используемая для расчета дифракционных картин когерентного рассеяния теория – кинематическая.

В случае же кристаллических материалов в зависимости от того, является исследуемый объект поликристаллическим или монокристаллическим, для описания процесса рассеяния рентгеновских лучей используется или кинематическая, или динамическая теория рассеяния, в их основе лежат модели идеально-мозаичного и идеального кристаллов соответственно [5], [7], [9], [13], [23], [24] (условие применимости кинематического приближения – размер кристаллита в направлении дифракционного вектора меньше экстинкционной длины для данного излучения и данного отражения – иногда нарушается даже при формировании спектра отражений от одного и того же поликристаллического объекта).

Естественно, для описания дифракции рентгеновских лучей на несовершенных кристаллах разработан широкий спектр моделей различной степени общности (в зависимости от типов несовершенств). Литература по данной проблеме настолько обширна, что даже простое перечисление затруднительно (см., например: [6], [15], [16], [17]).

Кроме того, и динамическая, и тем более кинематическая теории дифракции обычно описывают рассеяние на распределении электронной плотности в дипольном приближении, хотя, в принципе, излучение рентгеновских лучей возмущенной внешним полем электронной плотностью материала может быть описано и в квадрупольном [23], [24], и в магнитно-дипольном [2] приближениях.

При анализе картины рассеяния немонотонными материалами иногда необходимо учитывать экстинкционные эффекты (в поликристаллах [5]) или двукратное (многократное) рассеяние (в аморфных и поликристаллических материалах [37], [42]), что, в свою очередь, приводит к необходимости изменения модельных представлений о характере взаимодействия излучения с веществом. Более того, необходим анализ вклада в дифракционную картину, полученную от исследуемого объекта, некогерентного и диффузного рассеяния различной природы, что требует корректного применения соответствующих модельных представлений при расчете картины рассеяния.

В теории рассеяния необходимо рассматривать две задачи: прямую – расчет ожидаемой в эксперименте дифракционной картины по заданной модели объекта и обратную – нахождение пространственного расположения атомов в исследуемом материале по наблюдаемой экспериментальной картине рассеяния. Первая задача обсуждается практически в любой работе по теории рассеяния, вторая, значительно более сложная, решена в различной степени общности только в случаях монокристаллических объектов – классический структурный анализ (расшифровка структуры) и порошковых образцов (уточнение структуры методом полнопрофильного анализа). В основе этих методов лежит кинематическая теория рассеяния (иногда с модификациями, учитывающими экстинкционные поправки).

Итак, дифракционные методы исследования кристаллических материалов основаны на двух моделях кристалла – идеального и идеальномозаичного, каждой из которых соответствует своя теория рассеяния – динамическая и кинематическая.

Модель поликристаллического объекта – совокупность большого числа малых (по сравнению с экстинкционной длиной), хаотически ориентированных друг относительно друга и относительно падающего на образец пучка кристалликов, имеющих равноосную форму. Теория рассеяния, используемая для расчета теоретической рентгенограммы, – кинематическая.

## 2. СТАНДАРТНЫЕ МЕТОДЫ АНАЛИЗА ПОЛИКРИСТАЛЛИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ

Требования к образцам поликристаллических материалов для исследования стандартными методами рентгенографии следующие:

- Однородность по составу и состоянию. В случае неоднородных объектов модель механической смеси частиц разных кристаллических фаз должна «работать».
- Отсутствие преимущественной ориентации кристалликов (порошинок) текстуры.
- Монодисперсность и равноосность формы кристалликов или хотя бы подчиненность этих параметров стандартным функциям распределения (типа гауссова).

2.1. Качественный и количественный фазовый анализ многофазных объектов [4], [10], [14], [20], [21], [28], [39], [41]

Фазовый анализ, то есть идентификация фаз, входящих в состав исследуемых образцов, и определение количественного содержания фаз, присутствующих в гетерогенном многофазном образце, – широко распространенная задача. Рентгеновский метод фазового анализа является универсальным, объективным, быстрым и точным. Тем не менее при исследовании сложных многофазных объектов и образцов, особенно если в них присутствуют новые неисследованные фазы, а также в ряде других случаев сочетание рентгеновского фазового анализа с другими методами исследования не только целесообразно, но и необходимо.

Рентгеновский фазовый анализ основан на том, что рентгенограмма порошкового гетерогенного образца представляет собой сумму рентгенограмм отдельных фаз. Каждая фаза характеризуется своим набором линий на рентгенограмме, то есть дифракционная картина служит однозначной характеристикой данного кристаллического вещества.

Могут ли различные вещества давать одинаковые рентгенограммы? Чтобы это произошло, необходимо кристаллизовать два вещества в одних и тех же кристаллических системах, причем периоды элементарной ячейки обоих веществ должны быть одинаковы и расположение атомов в элементарных ячейках должно быть идентичным. Такое бывает редко, однако случается, что параметры решетки отличаются незначительно (например, Ta и Nb). Для соединений совпадения бывают еще чаще, особенно если в образце есть кристаллики, в которых в одних и тех же позициях могут присутствовать атомы разного сорта (например, сплав), а размеры элементарной ячейки зависят от концентрации компонент. Например, сплав CuAu имеет кубическую решетку, период которой находится в пределах от 3,62 Å (чистая медь) до 4,08 Å (чистое золото). При определенной концентрации сплав может иметь период элементарной ячейки  $a = 4,048 \text{ Å}$ , то есть период решетки алюминия. В таких ситуациях необходимо применять наряду с рентгеновским методом другие методы исследования.

Обычно дифракционная картина от поликристаллического образца описывается набором меж-

плоскостных расстояний  $d$  и относительных интенсивностей  $I$ . Для наглядности очень часто вместо таблицы значений  $d$  и  $I$  строят штрих-диаграммы, на которых длина отрезка пропорциональна относительной интенсивности отражения с данным межплоскостным расстоянием (рис. 1).

Самые сильные линии рентгенограммы данного вещества называются реперными. Они исчезают на рентгенограмме последними, если содержание данной фазы в образце падает. По таким линиям обычно выявляют фазы. Поэтому минимальное количество вещества, при котором еще заметны реперные линии данной фазы, определяет чувствительность фазового анализа.

Чувствительность зависит от интенсивности интерференционных линий, которые дает на рентгенограмме исследуемое вещество. Как известно, интегральная интенсивность линий от порошкового образца определяется произведением

$$I_{hkl} = A(\theta, \mu) n^2 \lambda^3 L(\theta) P(\theta) F_{hkl}^2 e^{-2M} p, \quad (3)$$

где  $A(\theta, \mu)$  – множитель поглощения, зависящий от угла  $\theta$  и линейного коэффициента поглощения  $\mu$ , который, в свою очередь, зависит от атомного номера вещества и длины волны рентгеновского излучения  $\lambda$ ,  $L(\theta)$  – фактор Лоренца,  $P(\theta)$  – поляризационный фактор,  $F_{hkl}^2$  – структурный множитель,  $e^{-2M}$  – температурный множитель,  $p$  – множитель повторяемости,  $n$  – число элементарных ячеек в единице объема.

Чувствительность зависит от соотношения коэффициентов поглощения определяемой фазы и всей смеси. Фаза с большим коэффициентом поглощения (состоящая из тяжелых элементов с большой рассеивающей способностью) в смеси со слабо поглощающими фазами выявляется при малых ее содержаниях, и наоборот.

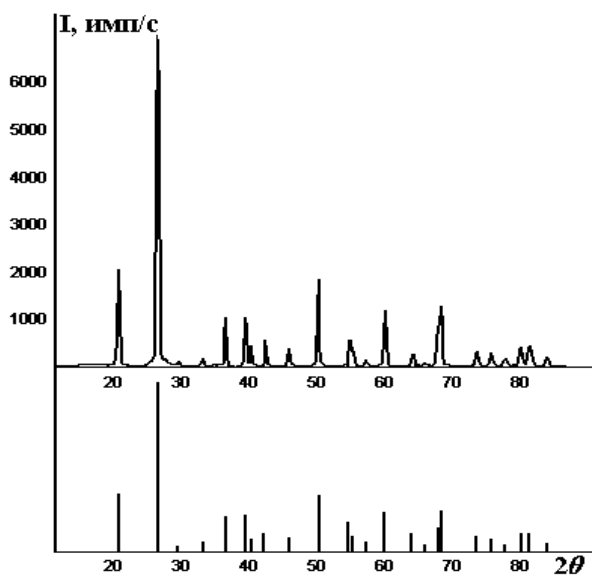


Рис. 1. Рентгеновский дифракционный спектр:  
а) реальный спектр, б) штрих-диаграмма

Значения множителя повторяемости определяются симметрией решетки. Чем выше симметрия решетки, тем при меньшем содержании фаза может быть выявлена. Чувствительность метода также зависит от наличия структурных искажений и дефектов в кристаллическом веществе и от величины кристаллитов. Все эти факторы могут вызывать уширение интерференционных линий, уменьшение их интенсивности и, следовательно, снижать чувствительность метода.

Чувствительность рентгеновского метода может быть повышена улучшением техники рентгеновской съемки и соответствующей подготовкой исследуемых образцов.

К преимуществам рентгеновского фазового анализа относятся следующие моменты:

- образец исследуется в неизменном состоянии, в то время как, например, при химическом анализе образец разрушается, так как чаще всего используют жидкостные методы, при спектральном анализе исследуемое вещество испаряется и т. д.;
- для анализа требуется незначительное количество вещества, иногда достаточно долей грамма материала;
- результатом анализа является непосредственное определение вещества и его кристаллической фазы. Многие материалы имеют полиморфные модификации. Не рентгеновскими методами их иногда трудно различить.

Трудности при качественном фазовом анализе таковы:

- если в исследуемом образце есть текстура, то есть преимущественная ориентация кристаллитов в образце, то искажается соотношение интенсивностей линий. Иногда она приводит к исчезновению на рентгенограмме некоторых отражений;
- порошок должен быть достаточно мелким, чтобы на величине измерений интенсивности отражений не сказывались эффекты первичной и вторичной экстинкции, и в то же время не слишком мелким, иначе линии на рентгенограмме будут сильно размыты;
- важно, чтобы кристаллиты не содержали большого количества дефектов, наличие которых сказывается и на форме линии, и на ее интенсивности.

В мировой практике для рентгеновского анализа широко используется картотека Объединенного комитета дифракционных стандартов (Joint Committee on Powder Diffraction Standards – JCPDS) Международного центра дифракционных данных (ICDD). Описание каждой индивидуальной кристаллической фазы в этой картотеке производится в стандартном формате, который называется карточкой JCPDS. Совокупность таких карточек образует ежегодные выпуски – сеты – картотеки.

Качественный рентгенофазовый анализ является процедурой поиска и выбора [20], [21], [39], цель которой – идентификация исследуемо-

го спектра с суперпозицией стандартных спектров, разыскиваемых и выбираемых из картотеки справочных данных.

### 2.1.1. Основные принципы количественного фазового анализа

Рентгеновский количественный фазовый анализ основывается на следующих положениях, вытекающих из теории дифракции рентгеновских лучей [10], [14]:

1. Дифракционная картина, то есть расположение и интенсивность максимумов на дифрактограмме, характеризует данное кристаллическое вещество и образуется независимо от присутствия в смеси других составляющих;
2. Интенсивность дифракционных максимумов в первом приближении пропорциональна концентрации фазы в смеси.

Исходя из этих положений, все методы рентгеновского количественного анализа принципиально сводятся к определению концентрации фазы в смеси по установленной теоретически или экспериментально зависимости между интенсивностью дифракционного максимума  $I_i$  и содержанием фазы.

Поскольку интенсивность дифракционных максимумов зависит от целого ряда факторов, установление точной аналитической зависимости интенсивности от концентрации фазы в большинстве случаев представляет сложную задачу и является основным объектом исследований при разработке любого метода количественного рентгеновского фазового анализа.

Интегральную интенсивность дифракционного максимума какой-то  $i$ -й фазы с некоторой объемной концентрацией  $v_i$  можно представить в виде:

$$I_i = k_1 k_2 k_{3i} A(\theta, \mu) v_i dV, \quad (4)$$

где  $k_1 = \left( \frac{e^2}{mc^2} \right)^2$  – интенсивность рассеяния электроном;

$k_2 = I_0 \frac{\lambda^3}{16\pi R_c}$  – коэффициент, определяемый условиями эксперимента,  $I_0$  – интенсивность первичного пучка,  $R_c$  – радиус гониометра,  $\lambda$  – длина волны используемого излучения;

$k_{3i} = \frac{P(2\theta_i)}{\cos \theta_i \sin^2 \theta_i} p_{hkl} |F_{hkl}|^2 N_i^2$  – коэффициент, определяемый кристаллической структурой фазы;  $dV$  – элемент объема образца.

Выражение (4) позволяет установить связь между величинами интенсивности  $I_i$  и объемной концентрацией  $v_i$ .

Необходимость разработки специальных методов количественного фазового анализа проистекает из того факта, что при одном и том же содержании определяемой фазы интенсивность

дифракционного отражения будет меняться в зависимости от величины среднего коэффициента поглощения рентгеновских лучей в образце. Необходимо либо найти эту зависимость и определять коэффициент поглощения образца, либо употребить приемы, позволяющие устранить влияние фактора поглощения.

Выбор метода количественного фазового анализа зависит от конкретных образцов, необходимой точности и экспрессности.

Правильным подбором режима и геометрии съемки, тщательным приготовлением образцов и многократными измерениями можно значительно снизить погрешности в определении объемных концентраций фаз, доводя их до 1–2 %.

### 2.2. Уточнение атомной структуры поликристаллических материалов методом полнопрофильного анализа [25], [26], [32], [36], [38], [40]

#### 2.2.1. Сущность метода полнопрофильного анализа

Реальная картина рассеяния в любой точке рентгенограммы представляет собой суперпозицию когерентного и некогерентного рассеяния.

Некогерентное рассеяние – это комптоновское рассеяние, тепловое диффузное и двойное вульф-брэгговское рассеяние. Кроме того, фоновое рассеяние может быть обусловлено: ближним порядком в расположении атомов, если речь идет о сплавах типа замещения; флюоресцентным излучением, если возбуждаются какие-то энергетические уровни атомов, входящих в состав исследуемого объекта; когерентным рассеянием, обусловленным наличием дефектов в кристаллитах, образующих поликристалл.

На фоновое рассеяние накладывается картина когерентного рассеяния на кристаллической решетке кристалликов конечных размеров, хаотически ориентированных друг относительно друга и относительно первичного луча. При этом распределение интенсивности в дифракционных максимумах обусловлено распределением кристалликов по размерам и форме. Это так называемый идеальный дифракционный профиль.

Реальный профиль дифракционного пика представляет собой свертку идеального профиля с набором функций, описывающих геометрические аберрации, возникающие из-за несовершенства геометрии рентгенографирования.

Метод полнопрофильного анализа был разработан в 1969 году Ритвельдом [40] для уточнения характеристик структуры кристаллов: размеров элементарной ячейки, координат атомов, коэффициентов заполнения позиций и амплитуд тепловых колебаний атомов по профилю порошковой дифракционной картины, полученной методом рассеяния нейтронов. В рентгенографии он нашел применение с 1977 года, когда практически одновременно появились работы [36], [38], в которых,

в принципе, была сохранена процедура уточнения структуры, предложенная Ритвельдом. Суть метода состоит в минимизации функционала

$$\Phi = \sum_{i=1}^N w(i) [I^o(i) - I^T(i)]^2, \quad (5)$$

где  $I^o(i)$ ,  $I^T(i)$  – экспериментальные и рассчитанные для модели структуры кристалла интенсивности рассеяния в  $i$ -й точке профиля рентгенограммы,  $w(i)$  – весовая функция, определяется как  $1/\Delta I$  ( $\Delta I$  – погрешность в определении интенсивности точки профиля, пропорциональная корню квадратному из числа импульсов  $I$ ; чем больше интенсивность точки, тем меньше ее погрешность и, соответственно, тем больше вес этой точки),  $N$  – число точек профиля.

Интенсивность в каждой точке профиля теоретической рентгенограммы вычисляется как сумма вкладов всех рефлексов плюс величина фона  $I^\Phi(i)$  в данной точке:

$$I^T(i) = sc \sum_{m=1}^L I_m \cdot PF_m(i) \cdot A_{asm}(i) \cdot G_{tm}(i) + I^\Phi(i), \quad (6)$$

где  $I_m \equiv I_{hkl}$  – интенсивность  $m$ -го рефлекса рентгенограммы, имеющего индексы  $hkl$ ;  $sc$  – коэффициент приведения расчетной рентгенограммы к масштабу экспериментальной, рассчитываемый по формуле:

$$sc = \frac{\sum_{i=1}^N I^o(i) - \sum_{i=1}^N I^\Phi(i)}{\sum_{i=1}^N I^T(i)}, \quad (7)$$

где суммирование ведется по всем точкам рентгенограммы.

### 2.2.2. Построение теоретического профиля

Для построения теоретического профиля  $I^T(i)$  вначале рассчитываются данные, необходимые для построения штрих-диаграммы для выбранной модели кристалла: вычисляются положения дифракционных линий и их интегральная интенсивность.

Положения дифракционных линий рассчитываются, исходя из заданных для модели значений периодов и углов элементарной ячейки.

Для получения значений интегральной интенсивности  $I_{hkl}$  интерференционной линии с индексами  $hkl$  используется формула (3).

После проведения расчетов теоретической штрих-диаграммы дифракционные максимумы размываются функцией  $PF_{im}$ , определяющей

форму максимума и зависящей от угла рассеяния  $2\theta$ . Проблема выбора функции формы пика является ключевой проблемой метода полнопрофильного анализа.

Для описания формы пика в нейтронографии Ритвельдом использовалась функция Гаусса. Однако эксперименты показали, что профили рентгеновских отражений, имеющих, как правило, узкую вершину и широкие, медленно спадающие крылья, плохо описываются функцией Гаусса. Был опробован целый ряд функций, из которых наряду с функцией Гаусса в программах полнопрофильного анализа реализованы следующие: Лоренца I, Лоренца II, Лоренца 1.5, псевдо-Войта, Пирсона типа VII, представляющая собой свертку функций Гаусса и Лоренца, и ряд других.

И, наконец, последнее слагаемое в формуле (6)  $I^\Phi(i)$  – значение интенсивности фона при данном угле рассеяния  $2\theta$ .

В разных вариантах программ, реализующих метод полнопрофильного анализа, для аппроксимации экспериментального фона используются различные функции.

Таким образом, теоретически рассчитанный профиль рентгенограммы определяется двумя типами уточняемых параметров: структурными и профильными. К числу структурных параметров, точное определение которых является конечной целью данного метода, относятся координаты атомов, изотропные или анизотропные тепловые факторы, коэффициенты заполнения (заселенность) позиций атомов в элементарной ячейке. К профильным параметрам относятся параметры, определяющие степень размытия (величину полуширины) и форму пика в зависимости от угла отражения, коэффициенты полинома фона, параметры асимметрии пиков, текстуры и смещения пиков, обусловленных аберрациями используемой экспериментальной установки, периоды и углы элементарной ячейки.

### 2.2.3. Уточнение параметров модели

Поскольку функция  $I^T(i)$ , описывающая теоретическую рентгенограмму, нелинейно зависит как от параметров модели кристалла, которые надо уточнить, так и от профильных параметров, в формуле (6) она заменяется на два первых члена разложения ее в ряд Тейлора:

$$I^T(i) = [I^T(i)]_o + \sum_{j=1}^L \left( \frac{\partial I^T(i)}{\partial p_j} \right)_o \Delta p_j, \quad (8)$$

где  $p_j$  – уточняемые параметры, а  $\Delta p_j$  – их приращения. Число уточняемых параметров обозначено через  $L$ .

Условие минимума функционала (5) по  $l$ -му параметру имеет вид:

$$\sum_{i=1}^N w_i \sum_{j=1}^L \left( \frac{\partial I^T(i)}{\partial p_j} \right)_o \left( \frac{\partial I^T(i)}{\partial p_l} \right)_o \Delta p_j = \sum_{i=1}^N w_i \{ I^o(i) - [I^T(i)]_o \} \frac{\partial I^T(i)}{\partial p_l}. \quad (9)$$

Уравнения данного типа, записанные для каждого из  $L$  параметров модели, образуют систему из  $L$  уравнений, линейных относительно  $L$  приращений  $\Delta p_j$ , которая может быть решена методом Гаусса или матричным способом.

Уточненные параметры  $p_j = p_j + \Delta p_j$  используются для нового расчета теоретической рентгенограммы, функционала (5) и факторов недоуверности. Данная процедура повторяется многократно до тех пор, пока не будет достигнуто достаточно хорошее совпадение экспериментальной и теоретической кривых распределения интенсивности рассеяния.

Для оценки недоуверности получаемых результатов используются следующие факторы: профильный фактор  $R_Y$ , весовой профильный фактор  $R_{WY}$ , брэгговский фактор недоуверности по величине модулей структурных амплитуд  $|F_{hkl}|$   $RF1$ , брэгговский фактор недоуверности по величине структурных факторов  $|F_{hkl}|^2$   $RF2$ .

Брэгговские факторы дают хорошую оценку модели кристаллической структуры и являются слабо чувствительными к ошибкам измерений фона, а также к профильным функциям отражений. Таким образом, структурная модель подбирается по соответствию рассчитываемых из интегральных интенсивностей модулей структурной амплитуды и структурного фактора. Профильные факторы недоуверности учитывают суммарную неточность по всей рентгенограмме и дают возможность оценить качество моделирования профиля.

### 2.3. Расшифровка кристаллической структуры материала по порошковым дифракционным данным [11], [33], [34], [43]

Под порошковым рентгеноструктурным анализом (РСА) понимают совокупность методов дифракционного эксперимента, обработки и анализа экспериментальных данных, позволяющих установить атомную (или атомно-молекулярную) структуру материалов, которые могут быть получены только в виде порошка (поликристалла).

Основные этапы порошкового РСА:

1. Подготовка образца, получение дифракционной картины;
2. Проведение качественного фазового анализа. Индексирование рентгенограммы, определение кристаллографических характеристик: периодов, углов и объема элементарной ячейки, установление пространственной группы симметрии;
3. Разложение порошковой рентгенограммы на сумму интегральных интенсивностей (FPD-разложение), расчет и уточнение профильных параметров дифрактограммы и структурных факторов. Результатами проведения FPD-разложения являются: выбор наиболее корректного варианта индексирования порошковой дифрактограммы из нескольких возможных вариантов; получение «монокристалльного» набора квадратов структурных амплитуд  $F_{hkl}^2$ ;

набор факторов недоуверности  $R_p$  и  $R_{wp}$ , значения которых представляют собой наименьшие возможные значения, достижимые для данной порошковой дифрактограммы. В дальнейшем они могут служить ориентиром при окончательном уточнении решенной структуры на заключительном, 7-м, этапе;

4. Построение модели молекулы, молекулярного комплекса или базисной группы атомов;
5. Поиск положения молекулы или ее фрагмента в элементарной ячейке;
6. Полная расшифровка структуры;
7. Уточнение профильных параметров дифрактограммы и структурных характеристик исследуемого образца методом Ритвельда.

Структура кристалла считается решенной, когда на основании дифракционных данных можно построить трехмерную картину расположения атомов в элементарной ячейке, разумную с химической и стерической точки зрения.

Возможность применения порошковой дифрактометрии к решению структуры основана на резком сокращении числа искомых параметров за счет того, что априори задается информация о возможных структурных фрагментах исследуемого соединения, в частности о расположении атомов в молекуле или в молекулярном фрагменте. При проведении поиска положения молекулы в элементарной ячейке определяются координаты геометрического центра молекулы. Для этого достаточно найти только 6 параметров (или степеней свободы) – 3 ориентационных и 3 трансляционных, а затем пересчитать значения координат атомов, заданных относительно центра молекулы, в значения, заданные относительно начала координат элементарной ячейки. Однако следует отметить, что в реальной ситуации все не так просто.

Уточнение методом Ритвельда (пункт 7) позволяет определить, какой минимум найден – глобальный или локальный. Если при уточнении координат структура молекулы резко искажается, то необходимо искать новый вариант пространственной группы или модели молекулы, или и того, и другого вместе, то есть начинать с этапа 2.

Таким образом, решение структуры по порошковым данным – процесс неординарный, и в каждом отдельном случае требуется нестандартный подход.

Итак, при корректном подходе к проведению эксперимента и его обработке развитые в последние годы новые методы работы с обычными порошкограммами позволяют уверенно определять структуры соединений, содержащие до 30 (а иногда и более) неводородных атомов в независимой части элементарной ячейки.

### 3. АНАЛИЗ СТРУКТУРНОГО СОСТОЯНИЯ МЕЛКОДИСПЕРСНЫХ МАТЕРИАЛОВ, ДАЮЩИХ «РЕНТГЕНАМОРФНУЮ» КАРТИНУ РАССЕЯНИЯ

Данная проблема является очень сложной, так как традиционные, стандартные методики, по-



ставляемые обычно вместе с рентгеновскими дифрактометрами, которыми оснащены рентгеновские лаборатории институтов, в данном случае не работают. Требуется разработка специальных подходов, которые сейчас находятся в стадии развития, и есть надежда, что они в дальнейшем будут обобщены и сведены до уровня рутинных методов.

Первый вопрос, который возникает при получении в рентгенодифракционном эксперименте такого рода картины рассеяния: как отличить картину рассеяния аморфного объекта от картины рассеяния ультрамелкодисперсного кристаллического материала? Его приходится задавать при работе с аморфными или частично упорядоченными материалами. Первое естественное желание – рассчитать теоретическую картину рассеяния для известных кристаллических фаз исследуемого материала, создаваемую совокупностями хаотически ориентированных кристалликов очень малого размера, начиная от одной элементарной ячейки и постепенно увеличивая эти размеры в разных направлениях. Это стандартная процедура проверки мелкокристаллитной модели при структурном анализе аморфных материалов [1], [29], о котором в рамках данной статьи ничего не говорилось.

В качестве примера на рис. 2 приведены взятые из работы [18] экспериментальная и расчетные кривые  $s$  – взвешенной интерференционной функции  $H(s)$ , которая более контрастна по сравнению с обычным распределением интенсивности рассеяния, для диопсида.

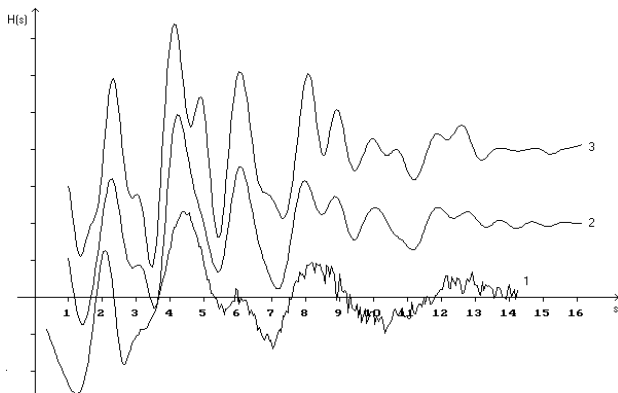


Рис. 2. Интерференционная функция  $H(s)$  ( $s = 4\pi \sin \theta / \lambda$ , Å<sup>-1</sup>):

1 – экспериментальная кривая, полученная для глушеного стекла на основе диопсида; 2 – рассчитанная кривая для кластера, состоящего из 1 элементарной ячейки диопсида; 3 – рассчитанная кривая для кластера, состоящего из 2 элементарных ячеек диопсида

Видно, что только для минимального кристаллита, состоящего из одной элементарной ячейки, содержащего 40 атомов, имеет место качественное соответствие экспериментальной и теоретически рассчитанной картин рассеяния. При увеличении размера кристаллита всего в 2 раза вид кривой  $H(s)$  существенно усложняется:

появляются дополнительные максимумы, пики становятся более узкими и высокими. Это свидетельствует о том, что порядок во взаимном расположении атомов в модельных кластерах значительно выше порядка в расположении атомов в области ближнего упорядочения исследуемого стекла. В то же время качественное соответствие картин рассеяния (кривые 1, 2 на рис. 2) свидетельствует о том, что в области ближнего упорядочения стекла присутствуют структурные элементы (например, цепочки кремнекислородных тетраэдров, соединенных вершинами), характерные для кристаллической структуры диопсида. То есть мелкокристаллитная модель области ближнего упорядочения атомов в данном случае не подходит [22].

Следующий этап поиска ответа на поставленный выше вопрос – анализ экспериментальных парных корреляционных функций и их характеристик [1], [29]: дальность корреляции во взаимном расположении атомов, зависимость дисперсий радиусов координационных сфер от радиуса сферы и т. д. Для жидких однокомпонентных материалов характерна линейная зависимость дисперсии радиусов координационных сфер от величины их радиуса. Это так называемый закон структурной диффузии Френкеля. В случае ультрамелкодисперсного кристаллического материала со сложной решеткой он не выполняется.

Если дальность корреляции во взаимном расположении атомов значительно превышает радиусы 4–5 координационных сфер, то можно ожидать, что мы имеем дело с ультрамелкодисперсным материалом с большими по размерам областями ближнего упорядочения, в которых возможен и дальний порядок (естественно, в пределах размера самих частиц). В этом случае на первом этапе анализ «рентгеноаморфной» картины рассеяния мелкодисперсного материала состоит из теоретических расчетов картин рассеяния в рамках мелкокристаллитной модели областей когерентного рассеяния (ОКР) и сопоставления с экспериментально наблюдаемой дифракционной картиной.

Теоретическое распределение интенсивности рассеяния описывается известной формулой Дебая в том случае, если наблюдаемая в эксперименте дифракционная картина создается множеством одинаковых, хаотически ориентированных друг по отношению к другу (а также по отношению к первичному пучку) модельных кластеров атомов. Учитывая, что в общем случае функция атомного рассеяния является комплексной величиной,  $f = f_o + \Delta f' + i\Delta f''$ , где  $\Delta f'$  и  $\Delta f''$  – первая и вторая дисперсионные поправки, формула для интенсивности рассеяния принимает следующий вид:

$$I(s) = \sum_{p=1}^N f_p f_p^* + \sum_{p=1}^{N-1} \sum_{q=p+1}^N (f_q f_p^* + f_p f_q^*) \frac{\sin(sr_{pq})}{sr_{pq}}. \quad (10)$$

Здесь  $s$  – модуль дифракционного вектора;  $r_{pq} = r_{qp}$  – расстояния между парой атомов с номерами  $p$  и  $q$  в кластере. Расчет распределения интенсивности по (10) требует большого количества времени, если кластер содержит несколько тысяч атомов. Эта техническая проблема может быть решена, если учесть, что в конденсированном состоянии вещества среди множества  $1/2 N(N-1)$  расстояний  $r_{pq}$  достаточно часто встречаются одинаковые или очень близкие по величине.

Алгоритм вычисления распределения интенсивности рассеяния рентгеновских лучей кластером атомов целесообразно построить по следующей схеме:

1. Вычисление всех межатомных расстояний в кластере с определением количества  $N_{r_i}$  одинаковых (в заданных пределах  $\pm \varepsilon/2$ ) расстояний между парами атомов. При этом вычисляется среднее значение по совокупности межатомных расстояний, попадающих в интервал  $\pm \varepsilon/2$ , а также дисперсия этого расстояния. Найденные средние расстояния, их дисперсии, количество расстояний, попадающих в интервал  $\pm \varepsilon/2$ , и тип пары атомов, находящихся на этих расстояниях друг по отношению к другу (запоминается сорт атомов), записываются в соответствующие массивы.
2. Вычисление распределения интенсивности рассеяния кластером производится по формуле:

$$I(s) = \sum_{p=1}^N f_p f_p^* + \sum_{i=1}^{N_{\max}} (f_p^* f_q + f_p f_q^*) N_{r_i} \frac{\sin(sr_i)}{sr_i} \exp(-0.5\sigma_i^2 s^2), \quad (11)$$

где первое слагаемое описывает независимое рассеяние атомами кластера, а второе обусловлено интерференцией рассеянных волн;  $N_{\max}$  – число различных межатомных расстояний  $r_i$ ;  $N_{r_i}$  – количество пар атомов в кластере, находящихся на одном и том же «среднем» расстоянии  $r_i$  друг от друга;  $\sigma_i$  – дисперсия  $r_i$ . Второе слагаемое в (11) содержит экспоненциальный множитель, который является формальным аналогом температурного фактора [27]. Он совпадет с последним, если кластер будет представлять собой фрагмент кристалла, атомы которого совершают тепловые колебания, а формально введенный параметр  $\varepsilon$  будет равен сумме максимальных амплитуд тепловых колебаний пары атомов.

Для сопоставления результатов расчета с экспериментом необходимо разделить  $I(s)$  на число единиц состава в кластере, поскольку значения интенсивности рассеяния, рассчитанные по формуле (11), зависят от числа атомов в кластере.

Методика анализа картин рассеяния рентгеновских лучей наноразмерными частицами заключается в последовательном расчете теоретических дифракционных картин по вышеприведенному алгоритму для разных вариантов модельных кластеров и сопоставлении теоретических кривых распределений интенсивности  $I(s)$  с экспериментально измеренными зависимостями.

Если в этих расчетах не удастся достичь удовлетворительного совпадения теоретически рассчитанной кривой с экспериментально измеренной, переходим к следующему этапу – построению модели расположения атомов в областях ближнего упорядочения методами компьютерного моделирования с последующим расчетом картины рассеяния и сопоставлением ее с экспериментом, после чего следует новая модификация конфигурации кластера атомов и т. д. Реализуется метод последовательных приближений. Данный процесс прекращается, если удастся построить модель кластера атомов, теоретическая картина рассеяния которого удовлетворительно совпадает с экспериментально наблюдаемой. В этом случае можно говорить о вероятной конфигурации атомов в области ближнего упорядочения в исследуемом объекте. Если совпадения теоретической и экспериментальной кривых достичь не удастся, то это означает, что все рассмотренные в процессе анализа модели конфигураций атомов неприемлемы для изучаемого объекта и необходимо изменять направление поиска модели.

Конкретную реализацию данного анализа можно найти в работе [19], в которой оценивается структурное состояние диоксида после длительного помола.

Таким образом, на основе вышеприведенного краткого обзора можно сделать вывод о том, что дифракционные методы анализа структурного состояния немонокристаллических материалов развиваются и позволяют получать количественную информацию о взаимном расположении атомов в них. Эта информация необходима для понимания процессов трансформации материалов при различных воздействиях.

Работа выполнена при поддержке Федерального агентства РФ по науке и инновациям, ГК № 02.740.11.0395.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Алешина Л. А., Фофанов А. Д. Рентгеноструктурный анализ аморфных материалов. Петрозаводск, 1987. 85 с.
2. Бабушкин Ф. А. Динамическая теория магнитного рассеяния рентгеновских лучей в антиферромагнетиках. Л.: Изд-во ЛГУ, 1979. 104 с.

3. Вайнштейн Б. К. Дифракция рентгеновых лучей на цепных молекулах. М.: Изд-во АН СССР, 1963. 372 с.
4. Васильев Е. К., Нахмансон М. С. Качественный рентгенофазовый анализ. Новосибирск: Наука. Сиб. отд-ние, 1986. 195 с.
5. Гинье А. Рентгенография кристаллов: Пер. с франц. М.: Физматгиз, 1961. 602 с.
6. Даценко Л. И., Молодкин В. Б., Осинковский М. Е. Динамическое рассеяние рентгеновских лучей реальными кристаллами. Киев: Наукова думка, 1988. 200 с.
7. Джеймс Р. Д. Оптические принципы дифракции рентгеновских лучей. М.: Изд-во иностр. лит., 1950. 572 с.
8. Дриц В. А., Сахаров Б. А. Рентгеноструктурный анализ смешаннослойных минералов. М.: Наука, 1976. 255 с.
9. Жданов Г. С., Илюшин А. С., Никитина С. В. Дифракционный и резонансный структурный анализ. М.: Наука, 1980. 256 с.
10. Зевин Л. С., Завьялова Л. Л. Количественный рентгенографический фазовый анализ. М.: Недра, 1974. 184 с.
11. Ивашевская С. Н. Исследование гетероароматических N-оксидов и их молекулярных комплексов методами порошкового рентгеноструктурного анализа: Автореф. дис. ... канд. физ.-мат. наук. Петрозаводск, 2002. 18 с.
12. Иверонова В. И., Ревкевич Г. П. Теория рассеяния рентгеновских лучей. М.: Изд-во МГУ, 1972. 246 с.
13. Каули Д. Ж. Физика дифракции: Пер. с англ. М.: Мир, 1979. 431 с.
14. Ковба Л. М., Трунов В. К. Рентгенофазовый анализ. М.: Изд-во МГУ, 1976. 232 с.
15. Кривоглаз М. А. Теория рассеяния рентгеновских лучей и тепловых нейтронов реальными кристаллами. М.: Наука, 1967. 336 с.
16. Кривоглаз М. А. Дифракция рентгеновских лучей и нейтронов в неидеальных кристаллах. Киев: Наукова думка, 1983. 406 с.
17. Кривоглаз М. А. Диффузное рассеяние рентгеновских лучей и нейтронов на флуктуационных неоднородностях в неидеальных кристаллах. Киев: Наукова думка, 1984. 288 с.
18. Лобов Д. В., Фофанов А. Д., Осауленко Р. Н. Модель атомной структуры глушенных стекол на основе диопсида // Электронный журнал «Исследовано в России». 2004. 125. 1315–1328 // <http://zhurnal.apelarn.ru/articles/2004/125.pdf>.
19. Лобов Д. В., Фофанов А. Д., Осауленко Р. Н., Калинин А. М. Рентгенографическое исследование структурного состояния образцов Диопсида после длительного помола // Электронный журнал «Исследовано в России». 2005. 085. 889–907 // <http://zhurnal.apelarn.ru/articles/2005/085.pdf>.
20. Нахмансон М. С., Фекличев В. Г. Диагностика состава материалов рентгенодифракционными и спектральными методами. Л.: Машиностроение, 1990. 357 с.
21. Нахмансон М. С., Черный Ю. А. Система автоматического рентгенофазового анализа АРФА. Л.: ЛНПО «Буревестник», 1982. 85 с. (Рукопись деп. в ВИНТИ 13.6.82. № 4150-82. Деп.)
22. Осауленко Р. Н. Структура и ближний порядок многокомпонентных стекол, полученных из отходов горнопромышленного производства: Автореф. дис. ... канд. физ.-мат. наук. Петрозаводск, 2003. 14 с.
23. Пинскер З. Г. Динамическое рассеяние рентгеновских лучей в идеальных кристаллах. М.: Наука, 1974. 368 с.
24. Пинскер З. Г. Рентгеновская кристаллооптика. М.: Наука, 1982. 392 с.
25. Сигаловская Ю. И., Сандомирский П. А., Урусов В. С. Уточнение структур порошковым полнопрофильным методом // Журнал структурной химии. 1985. Т. 26. № 4. С. 132–143.
26. Сигаловская Ю. И., Урусов В. С. Развитие рентгеновского полнопрофильного метода уточнения кристаллических структур // Методы дифракционных исследований кристаллических материалов: Материалы 5 школы по рентгеноструктурным методам анализа вещества. Иркутск, 1986. С. 59–69.
27. Скрышевский А. Ф. Структурный анализ жидкостей и аморфных тел. М.: Высшая школа, 1980. 328 с.
28. Уманский М. М. Рентгеновский качественный фазовый анализ // Заводская лаборатория. 1984. Т. 50. № 5. С. 20–26.
29. Фофанов А. Д. Структура и ближний порядок в кислород- и углеродсодержащих системах с особыми свойствами: Автореф. дис. ... д-ра физ.-мат. наук. М., 1998. 32 с.
30. Хейкер Д. М. Рентгеновская дифрактометрия монокристаллов. Л.: Машиностроение, 1973. 256 с.
31. Хейкер Д. М., Зевин Л. С. Рентгеновская дифрактометрия. М.: Физматгиз, 1963. 340 с.
32. Цыбуля С. В., Соловьева Л. П. Программа уточнения структур по полному профилю рентгенограммы // Аппаратура и методы рентгеновского анализа. 1988. Вып. 38. С. 46–61.
33. Чернышев В. В. Определение кристаллических структур по порошковым данным // Известия Академии наук. Серия химическая. 2001. С. 2171–2190.
34. Чернышев В. В. Определение молекулярных кристаллических структур методами порошковой дифракции: Автореф. дис. ... д-ра физ.-мат. наук. М., 2004. 48 с.
35. Driess V. A., Tchoubar C. X-Ray Diffraction by Disordered Lammellar Structures. Berlin Heidelberg: Springer-Verlag, 1990. 371 p.
36. Khattak C. P., Cox D. E. Profile analysis of X-ray powder diffractometer data: structural refinement of  $\text{La}_{0.75}\text{Sr}_{0.5}\text{CrO}_3$  // J. App. Cryst. 1977. Vol. 10. № 5. P. 733–739.
37. Malet G., Gabos C., Escande A., Delord P. Double Diffraction des Rayons X par une Substance Amorphe // J. Appl. Cryst. 1973. Vol. 6. P. 139–143.
38. Malmros G., Thomas J. O. Least-square structure refinement based on profile analysis of powder film intensity data measured on an automatic microdensitometer // J. App. Cryst. 1977. Vol. 10. № 1. P. 7–11.
39. Powder Diffraction File. Search Manual Hanawalt method. Inorganic. JCPDS. Swarthmore, Pennsylvania, USA. 1982.
40. Rietveld H. M. A profile refinement method for nuclear and magnetic structures // J. Appl. Crystallogr. 1969. Vol. 2. № 1. P. 65–71.
41. Use of the Powder Diffraction File. JCPDS / Ed. by R. Jenkins, R. Anderson, G. J. McCarthy. 1991.
42. Warren B. E., Mozzi R. L. Multiple Scattering of X-rays by Amorphous Samples // Acta Cryst. 1966. Vol. 21. № 3. P. 459–461.
43. Zlokazov V. B., Chernyshev V. V. MRFA – a program for a full profile analysis of powder multiphase neutron-diffraction time-of-flight (direct and Fourier) spectra // J. Appl. Crystallogr. 1992. Vol. 25. P. 447–451.

## CONTENTS

### BIOLOGY

Korosov A. V., Zamber N. S., Fomichev S. N., Uzenbaev S. S.

#### COMMON FROG (*RANA TEMPORARIA*, L.) SPAWN AND TADPOLES' SURVIVAL RATE IN SMALL TRANSIENT WATER BASINS

*Summary:* The following study defines the common frog (*Rana temporaria*, L.) survival rate at various stages of development in small transient water basins located in the southern part of Karelian Republic. The low survival rate of the common frog is indicative of insufficient reproduction capability of transient water basins during droughty seasons.

*Key words:* Amphibia, Ranidae, stages of development, survival rate, reproduction of population, reproductive basins .....7

Kuchko Ya. A., Kuchko T. Yu.

#### COMMUNITIES OF ONEGO LAKE ZOOPLANKTON IN TROUT FISHERIES AS INDICATION OF QUALITY

*Summary:* The article presents data on zooplankton communities in three bays of Onega Lake (Unitza, Svyatuha and Keften) The objective of the study was to characterize and determine differences in the taxonomy, abundance and structure of zooplankton communities in bays affected by biogenic pollution.

*Key words:* Zooplankton, Onego lake, trout fisheries .....9

Sergienko L. A.

#### MORPHOLOGICAL VARIABILITY IN GENUS *HONCKENYA* ERCH., FAM. *CARYOPHYLLACEAE*

*Summary:* The species in the genus *Honckenya* Erch. are in the process of active speciation due to unstable conditions in the coastal zone. Based on the study of the morphological characteristics of the plants and surface structure of the seeds, a new interpretation of the coastal species is given.

*Key words:* Coastal zone, halophyte, surface of the seeds, speciation.....13

Spiridonova E. A., Sysoeva M. I., Sherudilo E. G.

#### EFFECTS OF DAYLY SHORT-TERM TEMPERATURE DROP ON ORNAMENTAL PLANTS DEVELOPMENT

*Summary:* Effects of short-term (2 h and 6 h) temperature drop during 8, 12, 16 and 24 h photoperiods on budding and flowering of petunia and tagetes are studied. It is shown that during short-length photoperiods a short-term temperature drop forwards development of the plants. This effect lessens with the increase of photoperiod duration and is not observed in conditions of continuous light.

*Key words:* *Tagetes erecta*, *Petunia x hybrida*, flowering, budding, photoperiod, temperature drop .....18

Khizhkin E. A., Ilukha V. A., Lotosh T. A., Vinogradova I. A., Anisimov V. N.

#### FEATURES OF ANTIOXIDANT ENZYMES RESPONSE IN RATS WITH CIRCADIAN CYCLE DISRUPTION AT DIFFERENT STAGES OF ONTOGENESIS

*Summary:* The article evaluates the effect of constant light exposure on rats of one month and fourteen months old. The survival rate, life span and age-related dynamics of the activity in various organs of the experimental rats are compared to the same indices of the rats kept in the standard (12:12 h) light/dark mode. Exposure to constant light started on rats of fourteen months old delayed aging of the enzymatic components in the antioxidant defence system. Constant light exposure is, probably, one of the reasons for the life span prolongation in animals.

*Key words:* Constant light exposure, antioxidant enzymes, life span .....22

### MEDICINE

Zhestyanikov A. L., Dorshakova N. V., Karapetyan T. A.

#### MAJOR MINERAL ELEMENTS AND TRACE ELEMENTS IN NEUROCHEMICAL, NEUROPHYSIOLOGICAL MECHANISMS AND MAINTENANCE OF NORMAL BLOOD SUPPLY IN MEDULLARY SUBSTANCE

*Summary:* The article provides research results testifying to the considerable role of macro- and microelements and trace substances in the maintenance of normal cerebral circulation. Research results also point out to the misbalance of macro- and microelements in the pathogenesis of the cerebrovascular diseases. Data providing evidence of some chemical elements and metalloenzymes' participation in the mechanisms of neuroprotection, anti-oxidant action, and regulation of

endothelium functional capacity are presented. The problem of changes in element status and related cerebrovascular pathologies becomes relevant in the regions with challenging biogeochemical and climate conditions.

*Key words:* Major mineral elements, trace elements, neurochemical, neurophysiological mechanisms, blood supply of medullary substance .....27

*Kuznetsova L. V., Mejgal A. Yu., Varlamova T. V., Sokolov A. L.*

## NONINVASIVE DIAGNOSTIC METHODS OF IMPELLENT INFRINGEMENT SYNDROME IN CHILDREN OF EARLY AGE

*Summary:* The pathology of the backbone and the spinal cord is recognized as a relevant problem of neuro- and pediatric practice. Research for a diagnostic model combining noninvasive practices, availability and high efficiency is essential. Opportunities of using screening diagnostics and monitoring of the backbone and spinal cord structural changes are of special relevance in the field of neuropaediatrics. The authors draw attention to the use of the ultrasonography method on children with the syndrome of impellent infringement in perinatal genesis. Ultrasonography is most advisable for the estimation of structural changes in the encephalon, the backbone, and the spinal cord. It can be used effectively for the detection of functional changes, clinical evidence and neurofunctional examinations. (IMG, INMG).

*Key words:* Perinatal affection of the CNS, syndrome of movement disturbance, sonography, electroneuromiography .....36

*Markelov Yu. M., Shchegoleva L. V.*

## MATHEMATICAL MODEL OF BACILLARY TUBERCULOSIS SPREAD

*Summary:* Based on the statistical data of the past eight years (dynamics of the newly diagnosed bacillary patients and contingents (chronics), indices of abacillarity and lethality of bacillary patients), the authors created a mathematical model (simulator) of the “bacillary nucleus” formation. The created mathematical model confirms an assumption that less than 45 % of bacillary patients are revealed in Karelian region. Reduction of the “bacillary nucleus” can be observed only if no less than 75 % of bacillary patients and 85 % of abacillarized patients are diagnosed.

*Key words:* Bacillary patients, mathematical model, prognosis of tuberculosis epidemical situation .....42

## GEOSCIENCE

*Kuleshevich L. V., Lavrov O. B.*

## NATIVE COPPER, GOLD AND COPPER MINING IN KARELIA

*Summary:* The article reviews the history of native copper and gold detection and mining on the territory of Karelia. Description and structural components of native copper and native gold mined in Karelia are presented

*Key words:* Native copper and gold, copper sulphides, copper minning in Karelia .....46

## AGRICULTURE

*Iljinov A. A., Politov D. V., Raevsky B. V.*

## EFFECTS OF VARIOUS REFORESTATION METHODS ON GENETIC STRUCTURE OF *PICEA X FENNICA* (REGEL) KOM. COMPOSITE

*Summary:* Effects of several reforestation methods on genetic structure of *Picea x fennica* (Regel) Kom. were studied by means of isozyme electrophoresis. No statistically significant differences in genetic diversity level between the old-growth spruce forest and the secondary stand, grown out from the undergrowth extant and a seed-sown spruce plantation, was found. In general, the level of genetic diversity appeared to be high enough and similar to values obtained for the majority of conifers, particularly for *Picea* species.

*Key words:* Forest plantation, old-growth forest, secondary stand, form diversity, isozymes, genetic structure, gene diversity.....50

*Matyushkin V. A., Moshnikov S. A., Berdnikov I. A.*

## FORMATION AND PRODUCTIVITY OF SCOTCH PINE STANDS ON DRAINED MIRE

*Summary:* Data for density alteration in the species composition, productivity, and types of the Scotch pine stands, formed on drained mires with different types of peat deposits, are presented. Changes in the phytocoenosis occur due to gradual improvement of the soil after drainage. Formed forest phytocoenosis actively participates in the biological cycle directly contributing to the enhancement of soil fertility.

*Key words:* Drainage, peat deposit, stand, productivity, site quality, types of forests, litter fall, timber fall .....56

## ENGINEERING

*Vasilyev S. B., Kolesnikov G. N.*

## LOGICAL APPROACH TO MODELLING OF FREE-FLOWING SUBSTANCES FRACTIONATION

*Summary:* A physical model of free-flowing substances fractionation was considered. The mathematical simulation was carried out for chip screen modification needs. The correlation between calculated results and industrial experience confirms reliability of the designed equation.

*Key words:* Free-flowing substances, wood chips, fractioning process, mathematical simulation, Verhulst law .....61

*Shegelman I. R., Skrypnik V. I., Kuznecov A. V.*

## **HARVESTING MACHINES PERFORMANCE ANALYSIS AND EVALUATION OF THEIR EFFECTIVENESS IN VARIOUS WORKING ENVIRONMENTS**

*Summary:* The Paper analyses the effectiveness of harvesting machines based on the proposed rate of technological cross-country capacity with the use of GPS. The method of calculation, given in the paper, can be used to select the optimal forest machines system for working in various natural environments.

*Key words:* Forest machines, bearing capacity of soils, skidding lines, the system of harvesting equipment, the optimal choice, coefficient of technological potency .....66

*Ajukaev R. I., Koryaikina A. V., Selivanov A. S.*

## **EFFECTIVENESS OF BIOSORPTION PURIFICATION OF HIGHLY COLORED TURBID WATERS FROM SURFACE SOURCES**

*Summary:* The article considers possibilities of biological purification methods for highly colored waters. The calculation method for biosorption devices is offered. Comparative efficiency results for traditional technical purification schemes and biosorption schemes are provided.

*Key words:* Technology of biological purification, surface sources .....76

*Ushakova L. M.*

## **HIGH-DENSITY OF LOW-HEIGHT HOUSING CONSTRUCTION IN URBAN REDEVELOPMENT**

*Summary:* The article states that high-density of the low-height housing construction, effective use of the territory, particular town-planning conditions, making of the comfortable environment, conservation of the existing architectural environment of the historical towns are the main determinants for town reconstruction in many countries of the world.

*Key words:* Reconstruction of the towns, high-density of low-height housing constructions, effective use of the territory, comfortable dwelling .....82

*Kosenkov A. Yu.*

## **CLASSIFICATION OF WALLS IN TRADITIONAL KARELIAN WOOD ARCHITECTURE AND NEIGHBORING TERRITORIES OF RUSSIAN NORTH. PART II**

*Summary:* Classification of the wall structures in traditional wood architecture of the Russian North and a detailed engineering design of the "typological trees" employed to build timbered walls are published for the first time. Parameters of the used timber, framework development stages, techniques providing buckling resistance of the logs within a wall are reviewed.

*Key words:* Russian North, wood architecture, classification of wall structures, log walls, evolution of effective techniques .....86

## **PHYSICS AND MATHEMATICS**

### **All Russian seminar for young scientists "Problems and applications of the electrocharged processing in the industry of nanomaterials and nanosystems"**

*Podgorny V. I., Kushch S. D., Yakovlev A. N., Belashev B. Z.*

## **ON SOME RESULTS OF CARBON FULLERENES AND NANOTUBES SYNTHESIS IN ARGON ARCH DISCHARGE**

*Summary:* The article discusses some working modes of the argon and helium arch discharge and its special features revealed at work. It is shown that the inner part of the argon deposit consists of some small carbon rods. Sometimes these rods are dispersed into aggregates of carbon multi-walled nanotubes. It is demonstrated that the argon shoot contains about four structural phases. In the conditions of thermal treatment, water vapor, oxygen and carbon oxides are released from the argon fullerene black.

*Key words:* Arch discharge, graphite, cathode deposit, fullerene black, carbon multi-walled nanotubes .....98

*Phophanov A. D., Lobov D. V., Loginov D. V.*

## **X-RAY DIAGNOSTIC OF POWDER MATERIALS**

*Summary:* A short review of research methods based on x-ray diffraction for powder materials is given. Theoretical foundations of the methods, their possibilities, and restriction are discussed. The possibility to obtain structural data of the polycrystalline material with ultra-finely dispersed particles is emphasized.

*Key words:* Polycrystals, X-Ray analysis, the phase analysis, Rietveld method, «X-Ray amorphous», scattering picture .....106