
Министерство образования и науки
Российской Федерации

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

№ 2 (123). Март, 2012

Серия: Естественные и технические науки

Главный редактор

А. В. Воронин, доктор технических наук, профессор

Зам. главного редактора

В. Б. Акулов, доктор экономических наук, профессор

Э. К. Зильбер, доктор медицинских наук, профессор

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

И. Р. Шегельман, доктор технических наук, профессор

Ответственный секретарь журнала

Н. В. Ровенко, кандидат филологических наук

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

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

uchzap.petrso.ru

Редакционный совет

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

Редакционная коллегия серии
«Естественные и технические науки»

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

Ministry of Education and Science
of the Russian Federation

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

№ 2 (123). March, 2012

Natural & Engineering Sciences

Chief Editor

Anatoly V. Voronin, Doctor of Technical Sciences, Professor

Chief Deputy Editor

Vladimir B. Akulov, Doctor of Economic Sciences, Professor

Elmira K. Zilber, Doctor of Medical Sciences, Professor

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

Il'ya R. Shegelman, Doctor of Technical Sciences, Professor

Executive Secretary

Nadezhda V. Rovenko, Candidate of Philological Sciences

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

The Editor's Office Address

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

Petrozavodsk, Republic of Karelia

E-mail: uchzap@mail.ru

uchzap.petrSU.ru

Editorial Council

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

Editorial Board of the Series "Natural & Engineering Sciences"

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

СОДЕРЖАНИЕ

БИОЛОГИЯ

- Шустов Ю. А., Белякова Е. Н.
Питание молоди лососевых рыб в осенний период 7
- Дзюбук И. М., Клюкина Е. А.
Морфофизиологическая характеристика нагульного лосося (*Salmo salar* L.) Онежского озера с использованием статистических методов 11
- Резниченко Е. С., Горбач В. В.
Биотопические группировки булавосых чешуекрылых (Lepidoptera, Diurna) в экосистемах северной тайги Карелии. 19
- Шуйская Е. А., Антипина Г. С.
Синантропная флора Южной Карелии. 26

МЕДИЦИНСКИЕ НАУКИ

- Букалёв А. В., Виноградова И. А.
Роль эпифиза в организме. 31
- Данилов Г. П., Макеева Р. П., Шорников В. А., Зильбер Э. К., Акопов А. Л.
Клинико-функциональные результаты хирургического лечения бронхоэктазий у пациентов зрелого возраста. 37
- Ключевский В. В., Введенский В. П.
Эффективность комбинированной бронхоскопии при коррекции бронхообструкции у пострадавших с тяжелыми сочетанными травмами. 42
- Никитин С. С., Казак Л. Р., Ширяева А. Н., Долгова В. Ю., Шевченко Н. Г., Чудецкая С. А.
Использование лабораторного метода определения адренореактивности при сочетанных нарушениях функций тазовых органов у детей. 45

НАУКИ О ЗЕМЛЕ

- Филиппов М. М., Дейнес Ю. Е.
Традиционные и эвристические подходы к интерпретации геолого-геофизических материалов на перспективном для открытия месторождения максовитов участке Толвуйской синклинали 49

СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННЫЕ НАУКИ

- Майорова А. С., Болгов А. Е.
Рынок рыбной продукции в Республике Карелия. 57
- Матюшкин В. А., Мошников С. А., Бердников И. А.
Влияние внесения минеральных удобрений на продуктивность и накопление фитомассы культур сосны на осушенном переходном болоте. 62

ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ

- Борисов Г. А., Кукин В. Д.
Эволюционный алгоритм оптимизации распределительной электрической сети 67

- Колесников Г. Н., Кувшинов Д. А.
Декомпозиция конечно-элементной модели. . 71
- Косенков А. Ю.
Системы самцово-слеговых покрытий в жилище Карелии и сопредельных территорий Русского Севера 73
- Рочев А. А.
О расчете рамных систем из неупругих составных элементов. 78
- Цыпук А. М., Эгипти А. Э.
Подрезчик корней горизонтальный для лесных питомников 81
- Четверикова И. В.
Аналитические зависимости для обоснования условий переформирования многорядного плота. 85

ФИЗИКО-МАТЕМАТИЧЕСКИЕ НАУКИ

- Мольков С. И.
Влияние процессов на стенках капилляра на параметры плазмы положительного столба разряда низкого давления. 88
- Сысун В. И., Игнахин В. С.
К радиальной теории ионного тока на зонд: II. Учет объемной ионизации при наличии столкновений с атомами 95
- Хомиченко А. А., Фомин О. К.
Исследование шунгитовых пород и антраксолитов Карелии методом пиролитической масс-спектрометрии с поверхностной ионизацией 100
- Иванов А. В.
Теорема Катетова о кубе и полунормальные функторы. 104
- Талбонен А. Н., Рогов А. А.
Анализ машинописных подписей к фотграфиям в цифровом историческом альбоме 109
- Воронова А. М., Воронов Р. В., Пискунов М. А.
Моделирование схемы волоков при помощи покрытия гиперсети взвешенным корневым деревом 114

РЕЦЕНЗИИ

- Лаур Н. В., Царёв А. П.
Рец на кн.: Шегельман И. Р. Лесная промышленность и лесное хозяйство: словарь. . 118

Юбилей

- К 75-летию В. Н. Васильева 119
- К 60-летию А. И. Фетюкова.
К 75-летию Р. И. Аюкаева.
К 80-летию А. И. Шевченко 120

Информация для авторов 121

Contents 122

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

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

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

Учредитель: ФГБОУ ВПО «Петрозаводский государственный университет»

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

Подписано в печать 19.03.2012. Формат 60х90 1/8. Бумага офсетная. Печать офсетная.
10 уч.-изд. л. Тираж 500 экз. (1-й завод – 150 экз.) Изд. № 62.

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

ЮРИЙ АЛЕКСАНДРОВИЧ ШУСТОВ

доктор биологических наук, профессор кафедры зоологии и экологии эколого-биологического факультета, Петрозаводский государственный университет
shustov@prtrs.ru

ЕЛЕНА НИКОЛАЕВНА БЕЛЯКОВА

аспирант кафедры зоологии и экологии эколого-биологического факультета, Петрозаводский государственный университет
belyakovalena@yandex.ru

ПИТАНИЕ МОЛОДИ ЛОСОСЕВЫХ РЫБ В ОСЕННИЙ ПЕРИОД

Исследования питания молоди атлантического лосося и кумжи в осенний период в реках и ручьях Кольского полуострова показали, что по сравнению с летним периодом осенью у рыб в 5–6 раз снижается потребление кормовых объектов. Достаточно активное питание молоди атлантического лосося и кумжи даже в осенний паводок, при резком повышении уровня воды и скорости течения, свидетельствует о высоких адаптационных способностях молоди лососевых к речным условиям.

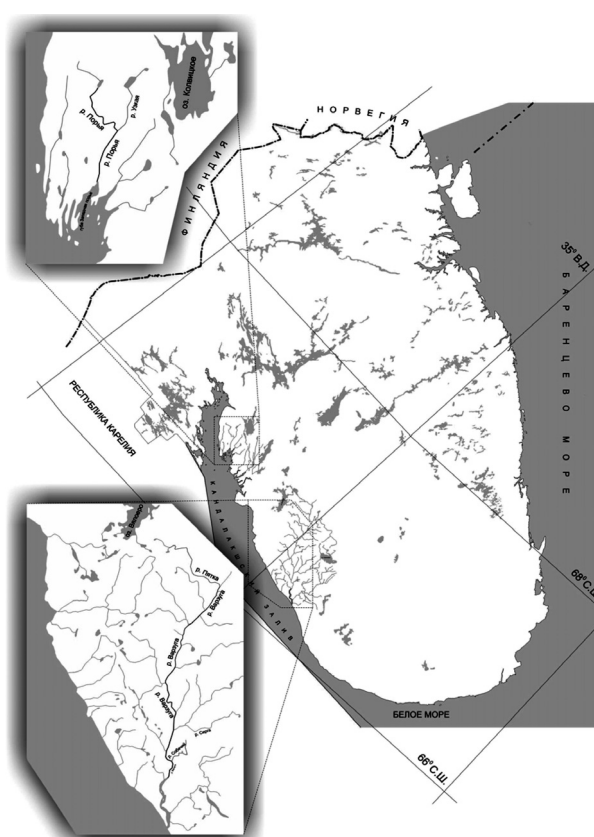
Ключевые слова: атлантический лосось, кумжа, молодь, питание, паводок, Кольский полуостров

ВВЕДЕНИЕ

В отечественной и зарубежной литературе преимущественное внимание отводится изучению различных аспектов питания молоди атлантического лосося *Salmo salar* L. и кумжи *Salmo trutta* L. в летний период [20], [14], [7], [17], [8], [3], [11], [15], [16], [19], [1]. В отношении осеннего питания рыб в речных условиях сведения скуднее. Известно только, что, например, в Верхней Печоре осенью молодь семги переходит на потребление крупных водных объектов – в итоге наблюдается повсеместное уменьшение в рационе доли личинок мошек и увеличение личинок ручейников и моллюсков [5], [9]. Исследование питания молоди семги и хариуса в р. Щугор в осенний период также показывает, что средний индекс наполнения кишечного тракта у рыб в этот период довольно высокий – 375 0/000, а главные объекты пищи – личинки ручейников (66 0/0 веса комка) и нимфы поденок (27 0/0). Ранее нами также было установлено, что перед ледоставом, несмотря на исчезновение воздушных и наземных насекомых, молодь кумжи в реках бассейна Онежского озера продолжает активно питаться, однако меняет приоритет в потреблении пищи: кормовые объекты выедаются рыбой непосредственно со дна [12]. Сведений о том, как питаются сеголетки и пестрятки лососевых рыб в период осеннего паводка, когда рыбы из-за сильного потока воды вынуждены уходить в укрытия между камнями, у нас нет.

МАТЕРИАЛ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Материалами для данной статьи послужили пробы сеголетков (возраст 0+) и пестрятков (возраст 1+...3+) атлантического лосося и кумжи, собранные на порогах и перекатах ряда семужьих рек и ручьев Кольского полуострова (бас. Белого моря) в летний и осенний сезоны (см. рисунок).



Карта-схема Кольского полуострова

Подробные характеристики беломорских водоемов, где нерестятся лосось и кумжа, представлены в монографии С. М. Калюжина [4], а сведения об экологии и поведении молоди атлантического лосося – в монографиях Ю. А. Шустова [11], А. Е. Веселова и С. М. Калюжина [1]. Установлено, что в реках Кольского полуострова молодь лососевых рыб обитает на участках рек с валунно-галечным грунтом глубиной менее 0,5 м и скоростью потока 0,2–0,3 м/с.

Рыбы отлавливались активными орудиями лова на р. Порья в 1974 году – мальковой ловушкой, в 2003 и 2004 годах – с помощью ранцевого электролова. Отлов рыб в период осеннего паводка (сентябрь 2004 года), когда уровень воды из-за непрерывных дождей резко поднялся на 1 м и выше, а скорость потока в местах обитания молоди лососевых рыб с 0,2–0,3 м/с увеличилась до 1 м/с и более, был крайне затруднен и проводился только у берега. Этой же причиной объясняется отлов столь небольшого количества молоди лосося и кумжи в паводок. Всего нами исследовано питание 116 экз. молоди (атлантический лосось – 86 экз., кумжа – 30 экз.). Вес сеголетков составлял около 1 г, длина – в пределах 4–5 см. Вес пестрятков лосося колебался в пределах 3,5–10 г, длина – 6,5–10,5 см. Вес пестрятков кумжи был значительно больше и максимально достигал 99 г.

После отлова рыб фиксировали 4 % раствором формалина. Камеральная обработка, согласно традиционным отечественным методикам [6], проводилась в лабораторных условиях. Пищевой комок извлекали только из желудков рыб; определяли общий индекс наполнения желудка (0/000 – отношение веса пищи, мг, к весу рыбы, г, умноженное на 10 000); подсчитывали количество организмов – общее и для основных систематических групп (табл. 1, 2). Организмы, редко встречающиеся в питании рыб, – олигохеты, пауки, Hydracarina, Coleoptera (L.), Hemiptera – в табл. 1 и 2 объединены под рубрикой «Прочие». В этих же таблицах в числителе представлены данные по частоте встречаемости организмов (в %); в знаменателе – количество организмов в одном желудке; + – меньше одного организма; (L.) – личинки, (P.) – куколки, (N.) – нимфы.

Таблица 1

Питание молоди атлантического лосося
в реках и ручьях Кольского полуострова (бассейн Белого моря)

Состав пищи	Летняя межень			Осенний период			
				Норм. режим	Осенний паводок		
	Р. Порья, 07.1974	Р. Порья, 08.1974	Ручей Пятка, 07.2004	Р. Порья, 10.1974	Ручей Пятка, 09.2004	Р. Индера, 09.2004	Р. Индера, 09.2004
Chironomidae (L.)	100,0 11	58,0 2	96,7 33	40,0 1		16,7 +	
Chironomidae (P.)	10,0 +	5,3 +	46,7 1				
Simuliidae (L., P.)	10,0 +	47,3 1	83,3 10				
Ephemeroptera (N.)	90,0 2	84,3 2	96,7 5	100,0 4	85,7 4	50,0 +	25,0 +
Plecoptera (N.)	20,0 +	15,8 +	76,7 2	60,0 1	85,7 7	66,7 1	25,0 +
Trichoptera (L.)	10,0 +	58,0 1	76,7 2	80,0 2	28,6 +		75,0 1
Mollusca		5,3 +					25,0 +
Прочие		36,8 1	23,3 +	10,0 +			
Insecta (субимаго, имаго)	10,0 +		36,7 6	10,0 +		16,7 +	25,0 +
Pisces							
Кол-во пищи, экз.	14	8	63	9	11	2	2
Индекс, 0/000	135	97	171	113	154	127	38
Стадия развития, кол-во рыб, экз.	Сеголеток 10	Сеголеток 19	Пестрятка 30	Сеголеток 10	Пестрятка 7	Сеголеток 6	Пестрятка 4

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ И ОБСУЖДЕНИЕ

Молодь атлантического лосося и кумжи, обитая длительный период жизни (несколько лет) в речных условиях на порогах и перекатах рек, попадает в некоторые сезоны года в явно неблагоприятные для жизни ситуации, такие как весенний паводок, экстремально высокие температуры воды в летнюю межень, образование шуги в начале зимы, промерзание малых водоемов зимой практически до речного дна и т. д. Исследования показывают, что и в этих суровых ситуациях молодь лососевых рыб не только не покидает свои индивидуальные участки обитания, но и продолжает потреблять пищу. Так, например, наши ранние исследования поведе-

ния и питания молоди озерного лосося в зимний период в нерестовых притоках Онежского озера показали, что это происходит несмотря на значительное снижение физической силы [13], [18] и как следствие – вынужденное обитание пестрятков зимой среди камней [2].

Настоящее исследование питания молоди атлантического лосося и кумжи в реках и ручьях Кольского полуострова также показало, что осенью, даже в самых неблагоприятных условиях – в период осеннего паводка, рыбы продолжают питаться (табл. 1, 2), причем у некоторых особей желудки плотно наполнены пищей. Так, например, во время осеннего паводка 2004 года у сеголетка кумжи длиной 4,5 см и весом 0,9 г, выловленного в ручье Ольховка, индекс наполнения

Таблица 2

Питание молоди кумжи в реках и ручьях Кольского полуострова (бассейн Белого моря)

Состав пищи	Летняя межень	Осенний период			
		Нормальный гидрологический режим	Осенний паводок		
		Ручей Собачий, 07.2004	Ручей Собачий, 10.2003	Р. Индера, 09.2004	Ручей Ольховка, 09.2004
Chironomidae (L.)	<u>47,6</u> 2			<u>50,0</u> +	<u>50,0</u> 1
Chironomidae (P.)					
Simuliidae (L., P.)	<u>40,0</u> 3				
Ephemeroptera (N.)	<u>40,0</u> 2				<u>75,0</u> 1
Plecoptera (N.)	<u>40,0</u> 1		<u>50,0</u> +		<u>100,0</u> 2
Trichoptera (N.)	<u>53,3</u> 2	<u>100,0</u> 4	<u>50,0</u> 2	<u>50,0</u> 4	<u>50,0</u> 1
Mollusca			<u>50,0</u> 1		
Прочие	<u>40,0</u> +	<u>42,9</u> 1			
Insecta (субимаго, имаго)	<u>93,3</u> 34	<u>28,6</u> 3	<u>100,0</u> 4	<u>100,0</u> 70	<u>25,0</u> +
Pisces	<u>33,3</u> +	<u>14,3</u> +	<u>50,0</u> +	<u>50,0</u> +	
Кол-во организмов в одном желудке, экз.	47	9	8	75	7
Индекс наполнения, 0/000	133	88	40	169	143
Стадия развития, кол-во рыб, экз.	Пестрятка 15	Пестрятка 7	Пестрятка 2	Пестрятка 2	Сеголеток 4

желудка составлял 200 0/000. Рыба питалась крупными формами амфибиотических насекомых (Chironomidae L. – 3 экз., Ephemeroptera N. – 2 экз., Plecoptera N. – 2 экз.; комар – 1 экз.). Из этого же ручья пестрятка кумжи весом 77 г и длиной 19,5 см (возраст 2+) имела индекс наполнения желудка в 204 0/000; пищевой спектр был следующим: 1 экз. сеголетка кумжи длиной 4 см и весом 0,8 г, 8 экз. личинок ручейников в песчаных домиках и около 70 экз. имаго насекомых (комары, муравьи, мелкие жучки). Некоторые сеголетки и пестрятки атлантического лосося в осенний паводок 2004 года также очень активно питались. Так, сеголеток лосося (вес – 0,7 г, длина – 4,2 см) из р. Индера имел желудок, плотно наполненный крупными формами водных беспозвоночных (индекс наполнения – 300 0/000; пищевой спектр: Plecoptera N. – 2 экз., Ephemeroptera N. – 3 экз., Chironomidae L. – 2 экз.). В ручье Пятка пестрятка лосося весом 3,7 г, длиной 7,3 см (возраст 1+) также питалась исключительно крупными формами амфибиотических насекомых, количество которых достигало более 30 экз. (индекс наполнения – 459 0/000; пищевой спектр: Ephemeroptera N. – 20 экз., Plecoptera N. – 20 экз., Trichoptera L. – 1 экз.).

Анализ так называемых параллельных проб, то есть проб рыб, отобранных из одной и той же реки, но в разные сезоны года, дал следующие результаты (табл. 2). К осени с нормальным гидрологическим режимом в ручье Собачьем у пестряток кумжи потребление количества пищевых организмов уменьшилось в 5,2 раза.

Однако переход на питание более крупными формами привел к снижению индекса наполнения желудков только на 33,8 %. Вес кормовых объектов к осени увеличился в 3,5 раза (в июле 1 экз. пищи имел индекс наполнения 2,8 0/000; в сентябре – уже 9,8 0/000). В ручье Пятка в осенний паводок по сравнению с июлем также происходит резкое уменьшение потребления количества пищевых объектов – в 5,7 раза, но за счет потребления крупных организмов индекс наполнения желудков снижается только на 10 %. Если в июле 1 экз. пищи имел индекс наполнения 2,7 0/000, то в сентябре – 14 0/000, то есть вес одного кормового объекта увеличился в 5,2 раза. Несколько другая ситуация наблюдалась в питании сеголеток лосося в р. Порье. Уже в летний период рыбки потребляли относительно крупные формы амфибиотических насекомых (1 экз. пищи имел в среднем за июль и август индекс наполнения в 11 0/000, в октябре – 12,7 0/000). По-видимому, по этой причине различия в интенсивности питания у сеголеток лосося летом и осенью практически не наблюдалось. В июле – августе индекс наполнения желудков в среднем составлял 110 0/000, в октябре – 113 0/000; летом рыбки в среднем потребляли 10 экз. кормовых объектов, в октябре – 9 экз.

Таким образом, наши исследования питания молоди атлантического лосося и кумжи в реках и ручьях Кольского полуострова в осенний период, в том числе в паводок, свидетельствуют о том, что даже в столь неблагоприятных гидрологических условиях (резкое повышение уровня

воды и скорости потока) сеголетки и пестрятки лососевых рыб продолжают питаться, причем у некоторых особей желудки плотно наполнены пищей. В то же время к осени у рыб наблюдается значительное снижение потребления количества кормовых организмов, однако переход на питание крупными формами беспозвоночных не вызывает заметного снижения потребляемой пищи. Наши результаты также подтверждают

тезис о высоких адаптационных способностях молоди лососевых рыб к речным условиям.

БЛАГОДАРНОСТИ

За помощь в проведении исследования и сборе полевых материалов благодарим своих коллег – профессора А. Е. Веселова и безвременно ушедшего из жизни профессора ПетрГУ С. М. Калюжина.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Веселов А. Е., Калюжин С. М. Экология, поведение и распределение молоди атлантического лосося. Петрозаводск: Карелия, 2001. 160 с.
2. Веселов А. Е., Шустов Ю. А. Сезонные особенности поведения и распределения молоди пресноводного лосося *Salmo salar* L. sebago Girard в реке // Вопросы ихтиологии. 1991. Т. 31. Вып. 2. С. 346–350.
3. Евсин В. Н., Иванов Н. А. Питание ручьевой форели *Salmo trutta* L. в реке Пулоньга (Кольский полуостров) в летнее время // Вопросы ихтиологии. 1979. Вып. 19. № 6. С. 1098–1104.
4. Калюжин С. М. Атлантический лосось Белого моря: проблемы воспроизводства и эксплуатации. Петрозаводск: ПетроПресс, 2004. 264 с.
5. Мартынов В. Г., Кулида С. В. Летне-осеннее питание молоди семги в бассейне Верхней Печоры // Тез. докл. 10-й сессии Ученого совета по проблеме «Биологические ресурсы Белого моря и внутренних водоемов Европейского Севера». Сыктывкар, 1977. С. 56–57.
6. Методическое пособие по изучению питания и пищевых отношений рыб в естественных условиях. М.: Наука, 1974. 254 с.
7. Митанс А. Р. Корреляционный поиск связей между питанием и ростом сеголеток балтийского лосося // Гидробиология и рыбное хозяйство внутренних водоемов Прибалтики. Таллин: Валгус, 1969. С. 205–215.
8. Сидоров Г. П., Шубина В. Н. Осеннее питание хариуса и молоди семги в р. Щугор // Тез. докл. 9-й сессии Ученого совета по проблеме «Биологические ресурсы Белого моря и внутренних водоемов Европейского Севера». Петрозаводск, 1974. С. 93–95.
9. Сидоров Г. П., Шубина В. Н., Мартынов В. Г., Рубан А. К. Биология атлантического лосося (*Salmo salar* L.) на этапе речной жизни / Коми филиал АН СССР. Сер. препринтов «Научные доклады». Вып. 35. Сыктывкар, 1977. 47 с.
10. Смирнов Ю. А., Шустов Ю. А., Хренников В. В. К характеристике поведения и питания молоди онежского лосося *Salmo salar* L. morpha sebago Girard в зимний период // Вопросы ихтиологии. 1976. Т. 16. Вып. 3. С. 557–559.
11. Шустов Ю. А. Экология молоди атлантического лосося. Петрозаводск: Карелия, 1983. 152 с.
12. Шустов Ю. А., Веселов А. Е., Барышев И. А. Питание молоди озерной кумжи *Salmo trutta* L. в реках бассейна Онежского озера в осенний период // Экология. 2008. № 2. С. 130–133.
13. Шустов Ю. А., Щуров И. Л., Веселов А. Е. Влияние температуры на физические способности молоди озерного лосося *Salmo salar* Sebago // Вопросы ихтиологии. 1989. Т. 29. Вып. 4. С. 676–677.
14. Allen K. R. Studies on the biology of the early stages of the salmon (*Salmo salar* L.). Feeding habits // J. Anim. Ecol. 1941. Vol. 10. № 1. P. 47–76.
15. Browman H. I., Marcotte B. M. Diurnal feeding activity and prey size selection in Atlantic salmon (*Salmo salar*) alevins // Developments in Environmental Biology of Fishes. 1986. Vol. 7. P. 269–284.
16. Huru H. Diurnal variations in the diet of 0 to 3 years old Atlantic salmon *Salmo salar* L. under semi-arctic summer conditions in the Alta River, Northern Norway // Fauna Norw. Ser. A. 1986. Vol. 7. P. 33–40.
17. Lillehammer A. 1973. Notes on the feeding relationships of trout (*Salmo trutta* L.) and salmon (*Salmo salar* L.) in the River Suldalslagen, West Norway, Norw. // J. Zool. Vol. 21. № 1. P. 25–28.
18. Shustov Yu. A., Shchurov I. L. Seasonal change in the stamina of young Atlantic salmon (*Salmo salar* L.) under river conditions // Finnish Fish. Res. 1990. Vol. 11. P. 1–5.
19. Stradmeyer L., Thorpe J. E. Feeding behavior of Atlantic salmon, *Salmo salar* L., parr in mid to late summer in a Scottish river // Aquacult. Fish. Manag. 1987. Vol. 18. P. 33–49.
20. White H. C. The food of salmon fry in Eastern Canada // J. Biol. Res. Board Canada. 1936. Vol. 2. P. 499–506.

ИРИНА МИХАЙЛОВНА ДЗЮБУКкандидат биологических наук, доцент кафедры зоологии и экологии эколого-биологического факультета, Петрозаводский государственный университет
*ikrup@petrsu.ru***ЕЛЕНА АЛЕКСАНДРОВНА КЛЮКИНА**кандидат технических наук, доцент кафедры теории вероятностей и анализа данных математического факультета, Петрозаводский государственный университет
*elenak@psu.karelia.ru***МОРФОФИЗИОЛОГИЧЕСКАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА НАГУЛЬНОГО ЛОСОСЯ
(*SALMO SALAR* L.) ОНЕЖСКОГО ОЗЕРА
С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ СТАТИСТИЧЕСКИХ МЕТОДОВ**

В статье представлены результаты исследований морфофизиологических характеристик нагульного лосося Онежского озера (возраст, масса, длина, высота, упитанность, пол, индексы органов) с использованием статистического анализа. Установлены различия между самками и самцами по индексу желудка, между особями из разных условий воспроизводства по индексам сердца и желудка. Выявлены закономерности изменений индексов внутренних органов, не зависящих от пола и условий воспроизводства.

Ключевые слова: Онежское озеро, пресноводный лосось, морфофизиологические показатели, компонентный анализ

ВВЕДЕНИЕ

Исследование лосося Онежского озера представляет определенный научный интерес, так как это ценный промысловый вид, численность которого неуклонно сокращалась [6]. Вследствие этого пресноводный лосось с 2001 года был занесен в Красную книгу Карелии. Меры по охране и воспроизводству этого вида привели к увеличению его численности [11].

С 1999 года сотрудниками Лаборатории экологических проблем Севера ПетрГУ проводится мониторинг юго-западного района Онежского озера, включающий и ихтиологические исследования. В ходе работ дается оценка популяций различных видов рыб, в том числе и пресноводного лосося. Результаты исследования нагульного лосося Онежского озера были представлены в работах Л. П. Рыжкова, И. М. Крупень с соавторами [12], [16], [17], [18]. Морфофизиологические показатели нагульного лосося оценивались с применением элементарных статистических приемов: вычисление средней, ее ошибки и критерия Стьюдента.

Цель настоящей работы – провести анализ данных по результатам морфофизиологического исследования нагульного лосося Онежского озера, используя современные методы математической статистики.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Материалом для статистического анализа послужили данные морфофизиологического исследования (размер, масса, индексы внутренних органов) лосося, выловленного в юго-западном районе Онежского озера (Шелтозеро – Брусно,

1999 год). Сбор и обработка ихтиологического материала осуществлялась по общепринятым методикам [14], [15], [19], [22].

Для анализа были использованы 50 особей (3+...7+), из них 30 самок и 20 самцов; 25 особей воспроизводились в заводских условиях («заводские»), 25 – в естественных («дикие»).

При математико-статистической обработке результатов исследования применялся дескриптивный (описательный) анализ, методы сравнения двух независимых выборок и компонентный анализ [1], [2]. Оценка достоверности различий между средними арифметическими осуществлялась по критерию Стьюдента (t-тест), а между дисперсиями – по критерию Фишера (F-тест) (при нормальном распределении признака) для уровня значимости $\alpha = 0,05$ [4], [5], [13].

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

В ходе анализа мы учитывали два альтернативных признака: самка – самец и естественное воспроизводство – заводское воспроизводство.

Итак, 30 проб из 50 содержат самок (значение 1), 20 – не содержат (значение 0). То есть выборка состоит из 30 единиц и 20 нулей. Доля вариантов со значением 1 (доля самок) составляет:

$$p = \frac{30}{50} = 0,6 \text{ (60 \%)}, \text{ тогда доля самцов } q = 0,4 \text{ (40 \%)}.$$

Отметим, что наиболее точные границы доверительного интервала для альтернативного признака дает ц-преобразование Фишера [9]. Итак, найдем границы доли самок лосося $p = 0,8$ при уровне значимости $\alpha = 0,05$: $\varphi_{лев.} = 1,772 - 2,008 \times \frac{1}{\sqrt{50}} = 1,4889$, $\varphi_{прав.} = 1,772 + 2,008 \cdot \frac{1}{\sqrt{50}} = 2,0551$,

$p_{лев.}(1,4889) = 45,9 \%$, $p_{прав.}(2,0551) = 73,3 \%$. То есть доля самок в генеральной совокупности (популяции лососей) составляет минимум 45,9 %, максимум 73,3 %.

Самки и самцы лосося были в возрасте от 3+ до 7+ лет. Наибольшее количество как самок, так и самцов было в возрасте 5+ или 2,3+ (то есть общий возраст – 5+, при этом рыбы 2-го года жили в реке и 3-го года в озере после ската). Масса (m), длина (D) и высота тела (h) лосося были в пределах 692,5–4325,0 г, 47,0–78,3 и 41,4–70,0 см соответственно.

Для альтернативного признака «условия воспроизводства» 25 проб из 50 содержат особей, воспроизведенных в естественных условиях (значение 1), и 25 – не содержат (значение 0). Значит, выборка состоит из 25 единиц и 25 нулей. Доля варианта со значением 1 составляет:

$p = \frac{\text{ля}}{\text{яц}} = \text{ця} (50 \%)$. Найдем с помощью ц-преобразования Фишера границы доверительного интервала при уровне значимости $\alpha = 0,05$ для доли «диких» особей ($p = 0,5$: $\varphi_{лев.} = 1,571 - 2,008 \times \frac{1}{\sqrt{50}} = 1,288$, $\varphi_{прав.} = 1,571 + 2,008 \cdot \frac{1}{\sqrt{50}} = 1,8541$,

$p_{лев.}(1,288) = 36 \%$, $p_{прав.}(1,8541) = 64 \%$. Таким образом, доля естественно воспроизведенных лососей в генеральной совокупности составляет минимум 36 %, максимум 64 %.

Возраст «заводских» особей был в пределах 3+...7+ лет, «диких» – 3+...5+. Наибольшее количество особей было возраста 5+ (2,3+).

При сравнении полученных результатов исследования нагульного лосося с данными Т. Н. Александровой с соавторами, М. Б. Зборовской, Ю. А. Смирнова [3], [7], [20] можно заметить, что за многолетний период не произошло значимых изменений по следующим показателям: возраст, размер, масса, количественный состав в различных размерных группах, хотя нагульное стадо в настоящее время сформировано из «диких» и «заводских» рыб.

В дополнение имеющихся данных [18] был проведен анализ различий между самками и самцами нагульного лосося не только по массе и размерам тела, но и по индексам внутренних органов.

Анализ различий между самками и самцами нагульного лосося

Масса и размер тела. И для самцов, и для самок выборочные значения стандартизованных асимметрии и эксцесса массы тела, а также размеров тела попадают в нормальный диапазон (табл. 1). При этом доверительные интервалы на уровне надежности 95 % для выборочных средних для самок и самцов соответственно равны: 1) [1827,51; 2848,49] и [1852,65; 2736,68] по массе (m); 2) [59,68; 69,67] и [60,87; 68,07] по длине тела (D); 3) [56,88; 66,77] и [57,84; 64,94] по длине тела

Таблица 1

Общая статистическая характеристика для массы, размеров и индексов органов самок и самцов лосося (3+...7+), лето 1999 года

Параметр		Статистика					
		Среднее	Дисперсия	Коэффициент вариации, %	Предел варьирования	Стандартизир. асимметрия	Стандартизир. эксцесс
Масса (m)	♂	2338,0	1,18975E6	46,65	400–5000	0,27	0,85
	♀	2294,67	1,40122E6	51,59	400–5100	1,971	0,23
Длина тела (D)	♂	64,68	114,06	16,51	43,5–81	-1,68	0,08
	♀	64,47	92,88	14,95	41,5–82,5	-0,31	0,14
Длина тела без хвостового плавника (d)	♂	61,83	111,80	17,10	40,5–77	-1,73	0,12
	♀	61,39	90,41	15,49	39,0–79,5	-0,21	0,04
Высота тела (h)	♂	58,20	97,85	17	38–72	-1,76	0,08
	♀	57,73	75,94	15,09	37–75	-0,34	0,01
Индекс сердца	♂	1,81	0,09	16,57	1,34–2,43	1,11	-0,42
	♀	1,95	0,38	31,79	1,37–4,75	7,67	16,6
Индекс печени	♂	12,63	16,81	32,46	1,32–20,58	-1,12	2,13
	♀	13,63	17,32	30,52	8,77–30,25	5,11	8,94
Индекс селезенки	♂	9,54	8,29	30,17	5,8–16,48	1,92	0,53
	♀	9,08	3,52	20,68	5,86–13,51	1,21	0,52
Индекс жабр	♂	40,65	165,17	31,62	4,64–71,51	-0,86	3,21
	♀	40,78	138,2	28,82	4,88–70,62	-0,48	3,21
Индекс желудка	♂	2,44	0,83	37,36	1,02–4,29	0,52	-0,73
	♀	2,44	7,65	113,6	0,97–16,42	10,61	27,31
Индекс кишечника	♂	27,77	34,07	21,02	20,54–48,7	4,73	8,04
	♀	27,54	32,87	20,82	11,72–43,75	0,53	2,92

Примечание. ♂ – самцы, ♀ – самки.

без хвостового плавника (d); 4) [53,57; 62,82] и [54,48; 60,99] по высоте тела (h).

Проверка с помощью t-теста подтвердила гипотезу о равенстве среднего значения для массы (m) и всех размеров тела (D, d, h) самок и самцов: для альтернативной гипотезы вычисленные значения вероятности P (0,896; 0,943; 0,879; 0,862) больше 0,05, альтернативная гипотеза о равенстве средних отвергается. Доверительные интервалы на уровне надежности 95 % для стандартных отклонений для самок и самцов соответственно равны: 1) [829,51; 1593,13] и [942,73; 1591,31] (m); 2) [8,12; 15,6] и [7,68; 12,96] (D); 3) [8,04; 15,44] и [7,57; 12,78] (d); 4) [7,52; 14,45] и [6,94; 11,71] (h).

Проверка равенства дисперсий с помощью критерия Фишера показала, что гипотеза о равенстве дисперсий выборок по массе и размерам тела (D, d, h) не отвергается, так как P (0,722; 0,604; 0,592; 0,526) больше 0,05.

Таким образом, по размерно-весовым показателям различий между самками и самцами нагульного лосося не было выявлено.

Для анализа был проведен расчет индексов органов (в %) лосося, которые широко используют в качестве морфофизиологических индикаторов состояния водной среды и организмов [15], [19], [21].

Индекс сердца. Значения стандартизованных асимметрии и эксцесса для самок лосося значительно превышают правую границу нормального диапазона от -2 до 2, что указывает на существенные отклонения от нормального распределения (табл. 1). У одной самки (3+) индекс сердца (4,8 %) больше, чем у других самок выборки, для которых максимальный предел варьирования равен 2,8 %. Исключив из рассмотрения данную особь, получили значения стандартизованных асимметрии и эксцесса для самок: 1,95 и 0,98 соответственно, которые принадлежат нормальному диапазону. Проверка с помощью t-теста подтвердила гипотезу о равенстве среднего значения по индексу сердца самок и самцов ($P = 0,65 > 0,05$); гипотеза о равенстве дисперсий выборок по критерию Фишера также подтверждается ($P = 0,72 > 0,05$).

Индекс жабр. Для обеих выборок значения стандартизованных эксцесса и асимметрии не попадают в нормальный диапазон, что указывает на существенные отклонения этих выборок от нормального (табл. 1). У 2 самок (2,1+ и 2,3+) индекс жабр (43,8 и 11,7 %) не входит в пределы варьирования данного показателя у особей этой выборки – 19,6–36,3 %. У одного из самцов (2,3+) индекс жабр (48,7 %) больше максимального предела варьирования индекса у самцов этой группы – 34,8 %. Исключив из рассмотрения выбросы, получили значения стандартизованных асимметрии и эксцесса для самок и самцов соответственно: 1,21 и 0,12; 0,97 и 1,05, принадлежащие нормальному диапазону. Проверка с

помощью t-теста подтвердила гипотезу о равенстве среднего значения по индексу жабр самок и самцов ($P = 0,45 > 0,05$); критерий Фишера показал, что гипотеза о равенстве дисперсий выборок также подтверждается ($P = 0,32 > 0,05$).

Индекс печени. Выборочные значения стандартизованного эксцесса для обоих полов, а также выборочное значение стандартизованной асимметрии самок находятся за пределами нормального диапазона (табл. 1). Это указывает на существенные отклонения исследуемых выборок от нормального распределения. У 2 самок (2,2+ и 3,2+) индекс печени (30,3 и 19,9 %) был больше максимального предела варьирования этого показателя (16,9 %) у самок данной выборки. У 2 самцов (2,2+ и 2,3+) индекс печени (20,6 и 1,3%) находится за пределами диапазона (8,8–18,4 %) индекса органа у самцов изучаемой группы. Исключив из рассмотрения выбросы, получили соответственно значения стандартизованных асимметрии и эксцесса для индекса печени у самок (0,26 и -1,3) и у самцов (0,85 и 0,03), принадлежащие нормальному диапазону. Проверка с помощью t-теста подтвердила гипотезу о равенстве среднего значения индекса печени самок и самцов ($P = 0,997 > 0,05$); критерий Фишера подтвердил гипотезу о равенстве дисперсий выборок ($P = 0,646 > 0,05$).

Индекс селезенки. Значения стандартизованных асимметрии и эксцесса по индексам селезенки для самок находятся за пределами нормального диапазона, что указывает на существенные отклонения данной выборки от нормального распределения (табл. 1). Для самок максимальный предел варьирования индекса равен 3,8 %, однако у одной самки (2,2+) он больше (16,4 %). Исключив этот выброс, получили соответственно значения стандартизованных асимметрии и эксцесса (1,74 и -0,66), которые принадлежат нормальному диапазону. С помощью t-теста подтверждена гипотеза о равенстве среднего значения по индексу селезенки самок и самцов ($P = 0,059 > 0,05$), а критерий Фишера показал, что гипотеза о равенстве дисперсий выборок также подтверждается ($P = 0,65 > 0,05$).

Индекс желудка. Для самок и самцов выборочные значения стандартизованных асимметрии и эксцесса для индекса желудка находятся в пределах нормального диапазона (табл. 1). Критерий Фишера показал, что гипотеза о равенстве дисперсий выборок отвергается ($P = 0,037 < 0,05$). Таким образом, по индексу желудка самки имеют существенные отличия от самцов.

Индекс кишечника. Для обоих полов выборочные значения стандартизованного эксцесса для индекса кишечника не принадлежат нормальному диапазону от -2 до 2 (табл. 1). У 2 самок (3,2+ и 2,4+) индекс кишечника (70,6 и 4,9 %) находится за пределами диапазона 21,8–61,9 %, а

свойственного самкам исследованной выборки. Также у 2 самцов (2,2+ и 2,3+) индекс не входит в пределы от 29,3 до 51,92 %, которые отмечены у самцов исследуемой возрастной группы. Исключив выбросы, получили значения стандартизированного эксцесса для индекса кишечника самок и самцов: 0,01 и -1,14, принадлежащие нормальному диапазону. С помощью t-теста подтвердили гипотезу о равенстве среднего значения по индексу органа ($P = 0,98 > 0,05$), а критерий Фишера показал, что гипотеза о равенстве дисперсий выборок также подтверждается ($P = 0,59 > 0,05$).

Анализ различий между «дикиими» и «заводскими» особями

Масса и размер тела. Для «диких» и «заводских» рыб (3+...5+) выборочные значения стандартизированных асимметрии и эксцесса массы, а также размеров тела попадают в нормальный диапазон (табл. 2). При этом доверительные интервалы на уровне надежности 95 % для выборочных средних «диких» и «заводских» особей соответственно равны: 1) [1635,23; 2543,23] и [1524,56; 2193,84] по массе; 2) [58,15; 67,46] и [57,64; 65,48] по длине тела (D); 3) [55,49; 64,55] и [54,53; 62,36] по длине тела без хвостового плавника (d); 4) [52,15; 60,58] и [52,15; 60,58] по высоте тела (h).

Проверка с помощью t-теста подтвердила гипотезу о равенстве среднего значения для массы тела и всех размеров (D, d, h) этих выборок: для альтернативной гипотезы о неравенстве средних вычисленные значения вероятности P (0,40; 0,69; 0,61; 0,66) больше 0,05, то есть альтернативная гипотеза отвергается. Доверительные интервалы на уровне надежности 95 % для стандартных отклонений для «диких» и «заводских» рыб соответственно равны: 1) [538,73; 1240,17] и [633,02; 1127,81] по массе; 2) [5,52; 12,72] и [7,42; 13,22] по длине тела (D); 3) [5,38; 12,38] и [7,40; 13,19] по длине тела без хвостового плавника (d); 4) [5,0; 11,51] и [6,92; 12,33] по высоте тела (h). Критерий Фишера показал, что гипотеза о равенстве дисперсий выборок по массе и размерам тела (D, d, h) не отвергается, так как значения вероятности P (0,81; 0,45; 0,4; 0,39) больше 0,05.

Также были исследованы отличия между естественно воспроизведенными и воспроизведенными на заводе особями (3+...5+) по индексам органов (табл. 2).

Индекс сердца. Для индекса сердца вычисленные значения стандартизированных асимметрии и эксцесса для «диких» и «заводских» особей в несколько раз превышают правую границу нормального диапазона от -2 до 2, что ука-

Таблица 2

Общая статистическая характеристика для массы, размеров и индексов органов лосося разных условий воспроизводства (3+...5+), лето 1999 года

Параметр		Статистики					
		Среднее	Дисперсия	Коэффициент вариации, %	Предел варьирования	Стандартизир. асимметрия	Стандартизир. эксцесс
Масса (m)	Е	2089,23	564424	35,96	800–3300	-0,32	-0,65
	З	1859,2	657233	43,60	400–3200	-0,66	-0,68
Длина тела (D)	Е	62,81	59,36	12,27	47,5–72	-0,81	-0,26
	З	61,56	90,34	15,44	41,5–76	-1,82	-0,06
Длина тела без хвост. плавника (d)	Е	60,02	56,22	12,49	45,5–69,5	-0,67	-0,41
	З	58,45	89,92	16,22	39,0–74	-1,61	-0,14
Высота тела (h)	Е	56,37	48,64	12,37	43,5–65,5	-0,60	-0,56
	З	55,12	78,55	16,08	37,0–69,0	-1,66	-0,18
Индекс сердца	Е	1,77	0,13	20,11	1,43–2,75	3,03	3,48
	З	1,99	0,39	31,43	1,34–4,75	7,78	17,41
Индекс печени	Е	14,91	30,0	36,74	9,59–30,25	2,96	3,64
	З	13,18	13,81	28,2	1,32–20,58	-1,95	3,61
Индекс селезенки	Е	2,21	0,99	45,0	1,07–3,65	0,54	-1,22
	З	2,88	8,54	101,5	1,21–16,42	9,11	21,74
Индекс жабр	Е	27,84	20,34	16,2	19,59–36,25	0,4	0,07
	З	28,03	50,88	25,45	11,72–48,7	1,97	3,33
Индекс гонад	Е	2,73	4,8	80,36	0,33–6,24	0,64	-1,13
	З	2,01	2,76	82,8	0,25–5,25	1,07	-1,31
Индекс желудка	Е	9,94	3,8	19,61	7,35–13,51	1,24	-0,11
	З	8,92	4,39	23,5	5,8–15,08	2,26	2,14
Индекс кишечника	Е	38,62	218,59	38,29	4,64–70,62	-0,22	2,25
	З	45,1	92,2	21,29	29,81–71,51	1,5	1,14

Примечание. Е — лосось естественного воспроизводства, З — лосось заводского воспроизводства.

зывает на существенные отклонения от нормального распределения. Заметим, что среди естественно воспроизведенных особей у одной (2,2+) индекс сердца (2,8 %) больше, чем у рыб изучаемой группы, для которых максимальный предел варьирования равен 2,18. Среди «заводских» особей у одной (2,1+) индекс сердца (4,8 %) также больше, чем у других особей изучаемой группы, для которых максимальный предел варьирования равен 2,43. Исключив из рассмотрения данные особи, получили следующие значения стандартизованных асимметрии и эксцесса соответственно: 1,83 и 1,61 для «диких», 0,42 и 0,28 для «заводских» особей, которые принадлежат нормальному диапазону. Критерий Фишера показал, что гипотеза о равенстве дисперсий выборок подтверждается на данном уровне значимости ($P = 0,497 > 0,05$), однако проверка с помощью *t*-теста отвергла гипотезу о равенстве среднего значения по индексу сердца воспроизведенных в разных условиях особей ($P = 0,029 < 0,05$). Следовательно, между особями естественного и заводского воспроизводства существуют достоверные различия по индексу сердца.

Индекс жабр. Значение стандартизованного эксцесса для индекса жабр воспроизведенных на заводе особей не принадлежит нормальному диапазону от -2 до 2 (табл. 2). Заметим, что для выборки «заводских» особей (3+...5+) есть три выброса (11,7, 48,7, 43,8 %), индексы жабр которых отличаются от относительного веса органа остальных особей, у которых индекс жабр варьирует от 20,5 до 34,8 %. Исключив из рассмотрения данные выбросы, получили следующие значения стандартизованных асимметрии и эксцесса для «заводских» рыб соответственно: 0,24 и -0,37, которые принадлежат нормальному диапазону. Критерий Фишера показал, что гипотеза о равенстве дисперсий выборок подтверждается ($P = 0,317 > 0,05$), проверка с помощью *t*-теста также подтвердила гипотезу о равенстве среднего значения по индексу жабр «диких» и «заводских» особей ($P = 0,597 > 0,05$).

Индекс селезенки. Для индекса селезенки значения стандартизованных асимметрии и эксцесса для «заводских» рыб в несколько раз превышают правую границу нормального диапазона от -2 до 2, что указывает на существенные отклонения от нормального распределения. У одной особи (2,2+) индекс селезенки (16,4 %) больше, чем у рыб этой группы, для которых максимальный предел варьирования равен 3,8. Исключив выброс, получили значения стандартизованных асимметрии и эксцесса для воспроизведенных на заводе особей (0,52 и -1,2 соответственно), принадлежащие нормальному диапазону. При этом критерий Фишера показал, что гипотеза о равенстве дисперсий выборок подтверждается ($P = 0,301 > 0,05$), а проверка

с помощью *t*-теста подтвердила гипотезу о равенстве среднего значения по индексу селезенки особей, воспроизведенных в разных условиях ($P = 0,724 > 0,05$).

Индекс печени. Значения стандартизованных асимметрии и эксцесса для «диких» особей по индексу печени, а также стандартизованного эксцесса для «заводских» рыб превышают правую границу нормального диапазона, что указывает на существенные отклонения от нормального распределения. У одной особи естественного воспроизводства (2,2+) индекс печени (30,3 %) больше, чем у остальных «диких» особей, для которых максимальный предел варьирования равен 19,9 %. У одной особи заводского воспроизводства (2,3+) индекс печени (1,3 %) меньше, чем у «заводских» особей изучаемой группы, для которых минимальный предел варьирования равен 9,3 %. Исключив из рассмотрения выбросы, получили значения стандартизованных асимметрии и эксцесса соответственно: 0,87 и -0,06 для «диких» особей; 1,28 и 0,17 для «заводских» особей, принадлежащие нормальному диапазону. Критерий Фишера показал, что гипотеза о равенстве дисперсий выборок подтверждается ($P = 0,697 > 0,05$), а проверка с помощью *t*-теста подтвердила гипотезу о равенстве среднего значения по индексу печени воспроизведенных в разных условиях особей ($P = 0,962 > 0,05$).

Индекс желудка. Значения стандартизованных асимметрии и эксцесса для индекса желудка «заводских» рыб немного превышают правую границу нормального диапазона. У одной особи заводского воспроизводства (2,1+) индекс желудка (15,1 %) больше, чем у «заводских» рыб, для которых максимальный предел варьирования равен 12,9 %. Исключив из рассмотрения выброс, получили значения стандартизованных асимметрии и эксцесса «заводских» особей соответственно: 0,83 и 0,44, принадлежащие нормальному диапазону. Критерий Фишера показал, что гипотеза о равенстве дисперсий выборок подтверждается ($P = 0,54 > 0,05$), однако проверка с помощью *t*-теста отвергла гипотезу о равенстве среднего значения по индексу желудка особей разных условий воспроизводства ($P = 0,045 < 0,05$).

Индекс кишечника. Для индекса кишечника вычисленное значение стандартизованного эксцесса для «диких» особей превышает правую границу нормального диапазона. У двух особей (3,2+ и 2,3+) индекс кишечника (70,6 и 4,6 %) выходит за границы диапазона 30,7–51,3 %, характерного для остальных рыб этой группы. Исключив из рассмотрения выбросы, получили значения стандартизованных асимметрии и эксцесса, которые принадлежат нормальному диапазону: 0,72 и -0,35 соответственно. Критерий Фишера показал, что гипотеза о ра-

венстве дисперсий выборок подтверждается ($P = 0,229 > 0,05$), а проверка с помощью t-теста отвергла гипотезу о равенстве среднего значения по индексу кишечника ($P = 0,057 > 0,05$). Следовательно, между особями разных условий воспроизводства существуют достоверные различия по индексу кишечника.

Оценка степени различия с помощью компонентного анализа

Степень различия между самками и самцами оценивалась по массе тела (m), длине тела (D), длине тела без хвостового плавника (d), высоте тела (h), индексам сердца (m1), печени (m2), селезенки (m3), жабр (m4), желудка (m5) и кишечника (m6) (табл. 3).

Заметим, что первая компонента учитывает большую долю исходной изменчивости (ее дисперсия равна $S_{ГК1}^2 = 4,72$ из 10, относительный

вес составляет 47,2 %). Информативность второй компоненты выражается дисперсией $S_{ГК2}^2 = 1,321$ и относительным весом, равным 13,21 %. Информативность третьей компоненты выражается дисперсией $S_{ГКш}^2 = \text{йФФ}$ и относительным весом, равным 12,23 %. Дисперсии остальных компонент меньше единицы, что указывает на их низкую информативность, поскольку по умолчанию минимальное значение дисперсии главной компоненты (Minimum Eigenvalue) принимается равным 1. График Scree Plot отражает изменение дисперсий компонент (сплошная линия) и минимальный уровень компонент (пунктир) (см. рисунок).

Значения факторных нагрузок для первых трех главных компонент рассматриваемых морфологических признаков представлены в табл. 4.

Таблица 3

Результаты расчетов компонентного анализа

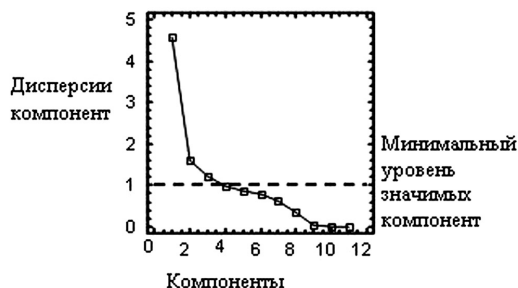
Номер компоненты	Значение дисперсий главных компонент (Eigenvalue)	Относительный вес главных компонент (Percent of variance)	Суммативный вес главных компонент (Cumulative percentage)	Значение дисперсий главных компонент (Eigenvalue)	Относительный вес главных компонент (Percent of variance)	Суммативный вес главных компонент (Cumulative percentage)
	Для общего фактора «пол особи»			Для общего фактора «способ воспроизводства»		
1	4,720	47,20	47,20	4,589	41,72	41,72
2	1,321	13,21	60,41	1,608	14,62	56,34
3	1,223	12,23	72,64	1,213	11,03	67,37
4	0,912	9,12	81,75	0,961	8,73	76,10
5	0,756	7,56	89,32	0,839	7,62	83,72
6	0,560	5,60	94,92	0,772	7,02	90,74
7	0,431	4,31	99,23	0,603	5,48	96,22
8	0,068	0,68	99,91	0,357	3,25	99,47
9	0,008	0,08	99,99	0,046	0,42	99,89
10	0,001	0,01	100,00	0,012	0,11	99,99
11	—	—	—	0,001	0,01	100,00

Таблица 4

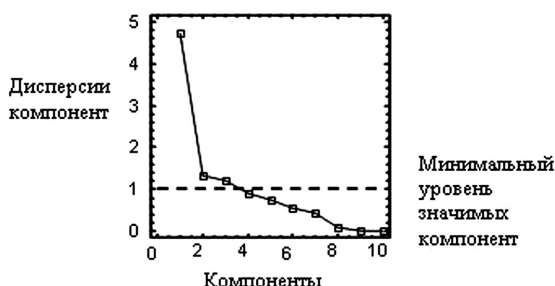
Таблица значений факторных нагрузок в главных компонентах

Признаки	Компонента					
	1	2	3	1	2	3
	Для общего фактора «пол особи»			Для общего фактора «способ воспроизводства»		
Масса тела (m) (г)	0,441	-0,099	0,188	0,439	-0,111	0,059
Длина тела (D) (см)	0,439	-0,103	0,211	0,452	-0,060	0,143
Длина тела без хвостового плавника (d) (см)	0,437	-0,115	0,213	0,451	-0,063	0,166
Высота тела (h)	0,432	-0,095	0,140	0,450	-0,067	0,166
Индекс сердца (m1) (мг)	-0,248	0,259	0,508	-0,278	0,033	0,524
Индекс печени (m2) (мг)	-0,222	-0,535	0,211	-0,170	-0,525	-0,005
Индекс селезенки (m3) (мг)	-0,107	-0,172	-0,352	-0,073	-0,006	-0,427
Индекс жабр (m4) (мг)	-0,177	0,387	0,561	-0,176	0,238	0,646
Индекс желудка (m5) (мг)	-0,173	-0,533	0,253	-0,156	-0,525	0,020
Индекс кишечника (m6) (мг)	-0,226	-0,374	0,223	-0,132	-0,451	0,177
Индекс гонад (m7) (мг)	—	—	—	0,113	-0,403	0,123

Изменение дисперсий компонент для
общего фактора «способ воспроизводства»
(график Scree Plot)



Изменение дисперсий компонент для
общего фактора «пол особи»
(график Scree Plot)



Изменение дисперсий компонент

Пример уравнивания расчета значений первой компоненты:

$$\begin{aligned} \text{Component 1} = & 0,432 \cdot m + 0,441 \cdot D + 0,439 \cdot d + \\ & + 0,437 \cdot h - 0,248 \cdot m1 - 0,222 \cdot m2 - 0,107 \cdot m3 - \\ & - 0,177 \cdot m4 - 0,173 \cdot m5 - 0,226 \cdot m6. \end{aligned}$$

Все факторные нагрузки первых четырех признаков положительны и больше 0,3, остальные – отрицательны и по модулю меньше 0,3, то есть их влияние наименее значимо. Первую компоненту можно назвать «Увеличение размеров лосося при увеличении его массы». Для второй компоненты 8 из 10 факторных нагрузок отрицательны, причем для индексов печени, желудка и кишечника их величина по модулю меньше 0,3; индекс жабр и индекс сердца имеют положительную факторную нагрузку, но только для индекса жабр ее величина больше 0,3. Поэтому вторую компоненту назовем «Увеличение индекса жабр при уменьшении индексов печени, желудка и кишечника». Третью компоненту можно назвать «Уменьшение индекса селезенки при увеличении индексов жабр и сердца», поскольку она объясняется в основном за счет переменных «индекс селезенки», «индекс жабр» и «индекс сердца», их факторные нагрузки соответственно равны -0,352, 0,561 и 0,508.

Отметим, что для всех трех главных компонент и для самцов, и для самок численные ха-

рактеристики принимают как положительные, так и отрицательные значения, то есть для этих компонент знак численной характеристики особи не зависит от пола.

Степень различия между особями разных условий воспроизводства оценивалась по m , D , d , h , $m1$, $m2$, $m3$, $m4$, $m5$, $m6$, $m7$ (индекс гонад) (табл. 3).

Как и в первой задаче, первые три компоненты накопили в себе основную содержательную информацию об отличиях особей по способу воспроизводства, заменяя собой в данном случае 11 исходных признаков. Дисперсия первой компоненты $S_{ГК1}^2 = 4,589$ из 11, относительный вес составляет 41,72 %. Информативность второй компоненты выражается дисперсией $S_{ГК2}^2 = 1,608$ и относительным весом, равным 14,62 %. Информативность третьей компоненты выражается дисперсией $S_{ГК3}^2 = 1,213$ и относительным весом, равным 11,03 %. График Scree Plot отражает изменение дисперсий компонент (сплошная линия) и минимальный уровень компонент (пунктир) (см. рисунок).

Значения факторных нагрузок для первых трех главных компонент рассматриваемых морфологических признаков представлены в табл. 4. Так, уравнение расчета значений первой компоненты следующее:

$$\begin{aligned} \text{Component 1} = & 0,439 \cdot m + 0,452 \cdot D + 0,451 \cdot d + \\ & + 0,45 \cdot h - 0,278 \cdot m1 - 0,17 \cdot m2 - 0,073 \cdot m3 - \\ & - 0,176 \cdot m4 - 0,156 \cdot m5 - 0,132 \cdot m6 + 0,113 \cdot m7. \end{aligned}$$

Все факторные нагрузки первых четырех признаков положительны и больше 0,3. Все остальные факторные нагрузки по модулю меньше 0,3, то есть их влияние наименее значимо, причем все они, кроме последней, отрицательны. Таким образом, первую компоненту, как и в первой задаче, назовем «Увеличение размеров лосося при увеличении его массы». Для второй компоненты 9 из 11 факторных нагрузок отрицательны (положительны только факторные нагрузки индексов сердца и жабр), причем только для индексов печени, желудка, кишечника и гонад их величина по модулю больше 0,3. Поэтому вторую компоненту можно назвать «Уменьшение индекса гонад при уменьшении индексов печени, желудка и кишечника». Третью компоненту, как и в первой задаче, можно назвать «Уменьшение индекса селезенки при увеличении индексов жабр и сердца», поскольку она объясняется в основном за счет переменных «индекс селезенки», «индекс жабр» и «индекс сердца», их факторные нагрузки соответственно равны -0,427, 0,646 и 0,524.

Отметим, что численные характеристики особей, выраженные в трех главных компонентах и для естественно воспроизведенных лососей, и для особей, воспроизведенных на заводе,

принимают как положительные, так и отрицательные значения. Таким образом, для этих компонент знак численной характеристики особи не зависит от способа воспроизводства.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Анализ морфофизиологических характеристик нагульного лосося юго-западного района Онежского озера (Шелтозеро – Брусно) с использованием современных методов математической статистики позволил существенно дополнить имеющиеся материалы [12], [16], [17], [18] новыми статистически достоверными ($P \geq 0,95$) результатами.

Установлено, что самцы и самки лосося (3+...7+) достоверно различаются ($P \geq 0,95$) по индексу желудка. Для остальных морфофизиологических признаков (масса, длина тела, длина тела без хвостового плавника, высота тела, индексы сердца, печени, селезенки, жабр, кишечника), исключая особи с патологией, существенных различий между самками и самцами не обнаружено ($P < 0,05$; при нормальном характере распределения выборок). Также для нагульного

лосося были выявлены следующие закономерности, которые не зависят от пола рыбы: увеличение размеров лосося при увеличении массы; увеличение индекса жабр при уменьшении индексов печени, желудка и кишечника; уменьшение индекса селезенки при увеличении индексов жабр и сердца.

Показано, что естественно воспроизведенные и воспроизведенные на заводе особи (3+...5+) достоверно различаются ($P \geq 0,95$) по индексам сердца и желудка. Для остальных морфофизиологических признаков (масса, длина тела, длина тела без хвостового плавника, высота тела, индексы печени, селезенки, жабр, кишечника, гонад), исключая особи с патологией, существенных различий не обнаружено ($P < 0,05$; при нормальном характере распределения выборок). Также для лосося (3+...5+) были выявлены следующие закономерности, которые не зависят от способа воспроизводства лосося: увеличение размеров лосося при увеличении массы; уменьшение индекса гонад при уменьшении индексов печени, желудка и кишечника; уменьшение индекса селезенки при увеличении индексов жабр и сердца.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Айвазян С. А., Енюков И. С., Мешалкин Л. Д. Основы моделирования и первичная обработка данных. М.: Финансы и статистика, 1983. 471 с.
2. Айвазян С. А., Енюков И. С., Мешалкин Л. Д. Прикладная статистика: Классификация и снижение размерности. М.: Финансы и статистика, 1989. 607 с.
3. Александрова Т. Н., Гуляева А. М., Кудерский Л. А. О нагульном лососе Онежского озера // Труды Карельского отдела ГосНИОРХ. Т. 5. Вып. 1. Петрозаводск, 1968. С. 274–286.
4. Боровиков В. П., Боровиков И. Д. Statistica. Статистический анализ и обработка данных в среде Windows. М.: Информационно-издательский дом «Филин», 1997. 608 с.
5. Гублер Е. В., Генкин А. А. Применение непараметрических критериев статистики в медико-биологических исследованиях. Л.: Медицина, 1973. 142 с.
6. Жаков Л. А., Меншуткин В. В. Практические занятия по ихтиологии. Ярославль: Ярославский госуниверситет, 1982. 112 с.
7. Зборовская М. Б. Материалы по промыслу и биологии лосося Онежского озера // Труды КНИРС. Т. 1. Л., 1935. С. 257–281.
8. Ивантер Д. Э., Рыжков Л. П. Рыбы. Петрозаводск: Изд-во ПетрГУ, 2004. 176 с.
9. Коросов А. В. Специальные методы биометрии: Учеб. пособие. Петрозаводск: Изд-во ПетрГУ, 2007. 364 с.
10. Коросов А. В., Горбач В. В. Компьютерная обработка биологических данных: Метод. пособие. Петрозаводск: Изд-во ПетрГУ, 2010. 84 с.
11. Красная книга Республики Карелия. Петрозаводск: Карелия, 2007. С. 229–230.
12. Крупень И. М., Рыжков Л. П. Морфофизиологическая индикация нагульного лосося Онежского озера // Современные проблемы физиологии и биохимии водных организмов: Материалы междунар. конф. 6–9 сентября 2004. Петрозаводск, 2005. С. 86–91.
13. Малета Ю. С., Тарасов В. В. Непараметрические методы статистического анализа в биологии и медицине. М.: Изд-во МГУ, 1982. 178 с.
14. Правдин И. Ф. Руководство по изучению рыб. М.: Пищ. пром-сть, 1966. 376 с.
15. Применение метода морфофизиологических индикаторов для оценки качественного состава рыб: Методические указания. Петрозаводск: Изд-во ПетрГУ, 1997. 20 с.
16. Рыжков Л. П., Крупень И. М. Значение искусственного воспроизводства в формировании структуры нагульной части популяции онежского лосося // Проблемы воспроизводства, кормления и борьбы с болезнями рыб при выращивании в искусственных условиях: Материалы науч. конф. 14–18 октября 2002. Петрозаводск, 2002. С. 102–107.
17. Рыжков Л. П., Крупень И. М. Морфофизиологические особенности нагульного лосося Онежского озера // Атлантический лосось: Биология, охрана и воспроизводство. Петрозаводск, 2003. С. 158–164.
18. Рыжков Л. П., Крупень И. М. Пресноводный лосось Онежского озера. Петрозаводск: Изд-во ПетрГУ, 2004. 152 с.
19. Смирнов В. С., Божко А. М., Рыжков Л. П., Добринская Л. А. Применение метода морфофизиологических индикаторов в экологии рыб // Труды СевНИОРХ. Т. 7. Петрозаводск, 1972. 190 с.
20. Смирнов Ю. А. Лосось Онежского озера. Л.: Наука, 1971. 143 с.
21. Строганов Н. С. Экологическая физиология рыб. М.: Изд-во АН СССР, 1962. 444 с.
22. Чугунова Н. И. Методика изучения возраста и роста рыб. М.: Советская наука, 1952. 115 с.

ЕЛЕНА СЕРГЕЕВНА РЕЗНИЧЕНКО

аспирант кафедры зоологии и экологии эколого-биологического факультета, Петрозаводский государственный университет
reznichenkoElena@yandex.ru

ВЯЧЕСЛАВ ВАСИЛЬЕВИЧ ГОРБАЧ

кандидат биологических наук, доцент кафедры зоологии и экологии эколого-биологического факультета, Петрозаводский государственный университет
gorbach@psu.karelia.ru

БИОТОПИЧЕСКИЕ ГРУППИРОВКИ БУЛАВОУСЫХ ЧЕШУЕКРЫЛЫХ (LEPIDOPTERA, DIURNA) В ЭКОСИСТЕМАХ СЕВЕРНОЙ ТАЙГИ КАРЕЛИИ

Видовой состав и встречаемость дневных бабочек изучали в окрестностях г. Костомукши в течение 4 сезонов (2007–2010 годы). Всего найдены 46 видов. 587 особей 42 видов зарегистрированы в ходе 518 учетов на трансектах в 74 биотопах. Преобладали малинница, крапивница и репейница. Наиболее богатые группировки бабочек формируются на лугах, самые бедные – в сосняках. Отмечена слабая биотопическая дифференциация населения в условиях северной тайги.

Ключевые слова: северная тайга Карелии, булавоусые чешуекрылые, биотопическое распределение видов, состав и структура группировок

Булавоусые, или дневные чешуекрылые, являются одной из хорошо исследованных групп насекомых. Вместе с тем изучение видового состава, распространения и особенностей экологии бабочек на конкретных территориях остается актуальной задачей. Большинство работ о булавоусых в Карелии посвящены южным районам, тогда как по территориям, расположенным к северу от Онежского озера, информации немного: опубликованная в середине прошлого века сводка Пелтонена [27] и по сей день остается основным источником для познания фауны бабочек северной тайги. Немногочисленные работы позднего периода [1], [8], [10], [11], [12], [13], [14], [17], [19] посвящены локальным фаунам Прибеломорья и международного российско-финляндского заповедника «Дружба». Всего из северотаежных провинций Карелии известно 59 видов булавоусых чешуекрылых, и данный список, по-видимому, близок к завершению [3]. Однако имеющиеся сведения о распространении и обилии видов фрагментарны, мало известно о закономерностях формирования биотопических группировок дневных бабочек в условиях северной тайги, их составе и структуре. Настоящая работа призвана восполнить недостаток знаний в этой области.

МАТЕРИАЛ И МЕТОДИКА

Исследования проводили в окрестностях г. Костомукши, в том числе на территории государственного природного заповедника «Костомукшский» (64°35' с. ш., 30°35' в. д.). Природно-климатические условия данного района типичны для Западно-Карельской возвышенности. Преобладающий тип рельефа – денудационно-тектонический холмисто-грядовый. Озера

занимают 8 % территории, болота – 18 %. Леса представлены сосняками, ельниками и мелколиственными насаждениями, покрывающими 49, 12 и 2 % всех земель соответственно. Около 9 % приходится на долю вырубок, пустырей, долог и просек. Лугов и полей немного, менее 2 % в структуре ландшафта [2]. Среднегодовая температура воздуха составляет +0,5 °С при среднемесячных показателях от –15 °С в феврале до +14 °С в июле. Количество осадков достигает 550 мм в год [9].

На исследуемой территории выбрали 74 местообитания, представляющих все основные типы биотопов, заселяемых дневными бабочками в условиях северной тайги Карелии. **Сфагновые болота** включали массивы с доминированием в растительном покрове сосны, олиготрофных кустарничков (карликовой березы, багульника, мирта болотного и др.), осок и пушиц. В лесных биоценозах бабочки встречаются лишь на открытых участках – полянах и просеках. Подобные местообитания в различных типах **сосновых лесов** не отличались существенным образом по составу растительности, их характерная особенность – бедность разнотравья и присутствие багульника, голубики и других болотных кустарничков. **Лиственные леса**, сформированные березовыми и осиновыми насаждениями, напротив, имели хорошо развитую, разнообразную травянистую растительность по открытым местам. Исследованные **луга** представлены комплексами разнотравно-злаковых и влажноразнотравных группировок. Постоянными компонентами растительных ассоциаций выступали низовые злаки (полевица, белоус, душистый колосок, овсяница красная и др.), мелкое и среднее мезофильное разнотравье (манжетки, лютики, горошек мышиный,

чина луговая и др.). Растительность **придорожных биотопов** сочетала признаки как лесных, так и луговых фитоценозов. Отличительная черта таких местообитаний – обилие сорных и рудеральных растений (погремка, одуванчика, осота, бодяка, крапивы и др.).

Встречаемость бабочек в выбранных местообитаниях исследовали в 2007–2010 годах. Использовали метод учета имаго на transekтах [28]. Длина tranсекта в зависимости от размера местообитания варьировала от 50 до 150 м при ширине 5 м. Учеты проводили с мая по сентябрь раз в 7–10 дней в солнечную погоду. При необходимости бабочек отлавливали, определяли, а затем отпускали или собирали как эталонные экземпляры. В качестве биотопической группировки мы рассматривали совокупность видов, зарегистрированных в одном местообитании в течение всего периода исследований. Данные по встречаемости бабочек унифицировали посредством пересчета числа особей на единицу площади (экз./га). По полученным выборкам изучали видовой состав, плотность населения, видовое разнообразие и общность группировок, формирующихся в сходных условиях. Видовое разнообразие измеряли с помощью показателей энтропии Шеннона и доминирования Бергера – Паркера, общность – евклидовым расстоянием [5], [7]. Значимость отличий параметров оценивали посредством однофакторного дисперсионного анализа [6]. Видовое богатство группировок, относительную биотопическую приуроченность видов и тренды изменчивости населения бабочек северной тайги исследовали после объединения выборок, полученных в местообитаниях, отнесенных к одному типу биотопов. Видовое богатство описывали кривыми насыщения [16]. Приуроченность оценивали по частоте встреч вида в каждом типе биотопов. Критерий χ^2 использовали для сравнения наблюдаемого и равномерного распределений частот. Статистический вывод о значимости различий между распределениями предполагает существование избирательности по отношению к местообитаниям. В таком случае в качестве избранного рассматривали местообитание с наиболее высокой встречаемостью особей. Сравнение частоты встреч вида в первом в иерархии местообитании с каждым следующим позволило выявить круг предпочитаемых местообитаний – группу, отличия между членами которой статистически незначимы. Поскольку данный метод нечувствителен к малым величинам, характеризующим встречаемость бабочек в наших выборках (экз./га), сохраняя принцип равенства площадей, мы использовали в расчетах действительные частоты встреч бабочек. Направления изменчивости населения изучали с помощью компонентного анализа [6]. В качестве значимых рассматривали главные компоненты с дисперсией больше единицы.

РЕЗУЛЬТАТЫ

В результате 518 учетов на 74 transekтах были зарегистрированы 587 особей 42 видов булавоусых чешуекрылых (табл. 1). Еще 4 вида – голубянка артаксеркс (*Aricia artaxerxes* (Fabricius, 1793)), чернушка болотная (*Erebia embla* (Thunberg, 1791)) и новые для карельской фауны червонцы непарный (*Lycaena dispar* (Haworth, 1809)) и бурый (*L. tityrus* (Poda, 1761)) найдены за пределами исследованных местообитаний. Доля трех наиболее многочисленных видов – малинницы, крапивницы и репейницы составила 41 % всех особей.

Биотопические группировки значительно отличались по числу видов (табл. 2: $F = 10,91$, $df = 4,69$, $\eta^2 = 0,39$, $p < 0,001$). Хорошей иллюстрацией изменчивости видового богатства населения служат кривые насыщения (рис. 1). Распадаясь на два кластера, они демонстрируют явное преимущество луговых и придорожных группировок чешуекрылых над лесными и болотными. Средняя плотность населения варьировала от 5,4 экз./га в сосняках до 27,2 экз./га на лугах ($F = 11,47$, $df = 4,69$, $\eta^2 = 0,40$, $p < 0,001$). Сравнение структуры группировок чешуекрылых, формирующихся в биотопах одного типа, с помощью евклидовой меры показало высокую степень однородности населения сосняков и значительную изменчивость луговых группировок. Отличия между выборками по данному параметру значимы ($F = 138,37$, $df = 4,522$, $\eta^2 = 0,51$, $p < 0,001$). Видовое разнообразие группировок, согласно индексу Шеннона, возрастало в направлении от сосняков и болот к лиственным лесам, придорожным биотопам и лугам ($F = 11,61$, $df = 4,69$, $\eta^2 = 0,40$, $p < 0,001$). Самым многочисленным видом в болотных, лесных и придорожных местообитаниях является малинница, на лугах отмечено доминирование репейницы. Заметное участие в формировании луговых группировок, кроме того, принимали зорька, брюквенница, малинница и дневной павлиний глаз, а в придорожных биотопах чаще других встречались крапивница и репейница. Оценка видового разнообразия по индексу доминирования Бергера – Паркера показала, что наименее выравненная структура населения бабочек свойственна сосновым лесам, где около 40 % особей приходится на долю малинницы. В других местообитаниях происходит расширение круга видов с относительно высокой встречаемостью и значения показателя значительно уменьшаются, достигая минимума в луговых группировках чешуекрылых ($F = 9,26$, $df = 4,69$, $\eta^2 = 0,35$, $p < 0,001$).

Относительная приуроченность к одному и более типам биотопов выявлена у 20 видов, их число варьирует от 1 в сосняках до 16 на лугах (табл. 1). Распространение многих видов по исследуемой территории сильно ограничено. Наиболее высокая локализация популяций отмечена для толстоголовки паламон, червонца

огненного, голубянки лесной, ленточника тополевого и углокрыльницы с-белое. Только на сфагновых болотах встречались перламутровки северная и эвномия, сенница болотная и сатир болотный, а голубянка эвмедон найдена лишь на лугах.

Метод главных компонент выявил одну значимую компоненту, учитывающую 75 % изменчивости исходной выборки (табл. 3). Все биотопические группировки имеют здесь примерно равные факторные нагрузки и составляют единственную плеяду.

Таблица 1

Видовой состав и плотность населения (экз./га) булавоусых чешуекрылых в местообитаниях северной тайги Карелии

Вид	Сфагновые болота, n = 11			Сосняки, n = 19			Лиственные леса, n = 15			Луга, n = 15			Придорожные биотопы, n = 14		
	M	S	Ps	M	S	Ps	M	S	Ps	M	S	Ps	M	S	Ps
<i>Pyrgus malvae</i> (Linnaeus, 1758) – Толстоголовка мальвовая	–	–	–	–	–	–	0,2	0,7	13	0,5	1,3	13	–	–	–
<i>Carterocephalus silvicola</i> (Meigen, 1829) – Т. лесная желтая*	0,4	1,2	10	–	–	–	0,2	0,7	13	–	–	–	–	–	–
<i>C. palaemon</i> (Pallas, 1771) – Т. палемон*	–	–	–	–	–	–	–	–	–	0,1	0,5	7	–	–	–
<i>Thimelicus lineola</i> (Ochenheimer, [1808]) – Т.-тире	–	–	–	0,2	0,6	11	–	–	–	0,8	1,4	27	–	–	–
<i>Papilio machaon</i> Linnaeus, 1758 – Махаон*	–	–	–	–	–	–	–	–	–	0,2	0,7	13	0,1	0,5	7
<i>Leptidea sinapis</i> (Linnaeus, 1758) – Беляночка горошковая	–	–	–	–	–	–	0,2	0,9	7	0,8	1,2	33	0,3	0,7	14
<i>Anthocharis cardamines</i> – Зорька	–	–	–	–	–	–	0,6	1,2	27	2,4	2,7	53	1,8	2,6	36
<i>Aporia crataegi</i> (Linnaeus, 1758) – Боярышница*	–	–	–	–	–	–	0,2	0,7	13	1,0	1,7	33	0,5	1,2	21
<i>Pieris brassicae</i> (Linnaeus, 1758) – Капустница*	–	–	–	–	–	–	0,1	0,5	7	0,1	0,5	7	0,3	0,7	14
<i>P. rapae</i> (Linnaeus, 1758) – Репница*	–	–	–	–	–	–	–	–	–	0,2	1,0	7	0,1	0,5	7
<i>P. napi</i> (Linnaeus, 1758) – Брюквенница	–	–	–	–	–	–	0,6	1,2	27	1,8	3,3	33	1,1	1,9	29
<i>Colias palaeno</i> (Linnaeus, 1761) – Желтушка торфяниковая*	0,4	0,8	20	0,5	1,1	21	0,5	1,1	20	0,2	1,0	7	–	–	–
<i>Gonepteryx rhamni</i> (Linnaeus, 1758) – Крушинница	–	–	–	–	–	–	1,0	1,4	40	1,0	2,1	27	0,7	1,6	21
<i>Callophrys rubi</i> (Linnaeus, 1758) – Малинница	1,9	1,7	70	2,2	2,0	68	3,4	3,3	80	3,0	3,2	67	4,2	3,0	86
<i>Lycaena virgaurea</i> (Linnaeus, 1758) – Червонец огненный*	–	–	–	–	–	–	–	–	–	0,1	0,5	7	–	–	–
<i>Celastrina argyolus</i> (Linnaeus, 1758) – Голубянка весенняя	0,5	1,2	20	0,1	0,4	5	–	–	–	–	–	–	–	–	–
<i>Plebejus argus</i> – Г. аргус*	0,5	1,2	20	0,3	0,7	16	0,1	0,5	7	0,5	1,1	20	0,1	0,5	7
<i>P. idas</i> (Linnaeus, 1761) – Г. идас*	0,2	0,6	10	0,1	0,4	5	–	–	–	–	–	–	–	–	–
<i>P. optilete</i> (Knoch, 1781) – Г. торфяниковая*	0,4	1,2	10	0,4	1,0	16	–	–	–	–	–	–	0,3	0,7	14
<i>Aricia eumedon</i> (Esper, [1780]) – Г. эвмедон	–	–	–	–	–	–	–	–	–	0,4	1,1	13	–	–	–
<i>Polyommatus icarus</i> (Rottemburg, 1775) – Г. икар*	0,4	0,8	20	–	–	–	–	–	–	0,2	0,7	13	–	–	–
<i>P. semiargus</i> (Rottemburg, 1775) – Г. лесная*	–	–	–	–	–	–	0,1	0,5	7	–	–	–	–	–	–
<i>Limnitis populi</i> (Linnaeus, 1758) – Ленточник тополёвый*	–	–	–	–	–	–	0,1	0,5	7	–	–	–	–	–	–
<i>Nymphalis antiopa</i> (Linnaeus, 1758) – Траурница*	–	–	–	–	–	–	–	–	–	0,1	0,5	7	0,1	0,5	7
<i>N. io</i> (Linnaeus, 1758) – Дневной павлиний глаз	–	–	–	–	–	–	0,9	2,5	20	2,0	3,0	40	1,2	2,2	36

Примечание. n – число исследованных местообитаний, M – средняя арифметическая, S – стандартное отклонение, Ps – доля местообитаний, где был отмечен вид (встречаемость, %), жирным шрифтом указана относительная биотопическая приуроченность вида, * – вид не обнаружил значимой приуроченности ни к одному из биотопов.

Продолжение табл. 1

Виды	Сфагновые болота, n = 11			Сосняки, n = 19			Лиственные леса, n = 15			Луга, n = 15			Придорожные биотопы, n = 14		
	M	S	Ps	M	S	Ps	M	S	Ps	M	S	Ps	M	S	Ps
<i>N. urticae</i> (Linnaeus, 1758) – Крапивница	–	–	–	0,4	1,0	16	1,1	2,6	27	1,5	2,8	33	2,4	3,6	43
<i>Polygonia c-album</i> (Linnaeus, 1758) – Углокрыльница с-белое*	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	0,1	0,5	7
<i>Vanessa atalanta</i> (Linnaeus, 1758) – Адмирал	–	–	–	0,1	0,4	5	0,6	2,0	13	1,4	3,0	20	0,7	1,8	14
<i>V. cardui</i> (Linnaeus, 1758) – Репейница	1,0	1,3	50	0,2	0,6	11	1,8	2,0	60	4,4	2,8	87	3,5	2,5	86
<i>Arashnia levana</i> (Linnaeus, 1758) – Пестрокрыльница	–	–	–	–	–	–	0,5	1,1	20	0,5	1,1	20	–	–	–
<i>Brenthis ino</i> (Rottemburg, 1775) – Перламутровка-таволжанка*	–	–	–	0,3	1,0	11	0,6	1,4	20	0,5	1,3	13	0,4	1,1	14
<i>Boloria aquilonaris</i> (Stichel, 1908) – П. северная	0,9	1,3	40	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
<i>Clossiana eunomia</i> (Esper, [1799]) – П. эвномия	0,5	0,9	30	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
<i>C. euphrosyne</i> (Linnaeus, 1758) – П. эфросина	0,2	0,6	10	0,2	0,6	11	–	–	–	0,9	1,3	27	0,3	1,0	7
<i>C. selene</i> ([Dennis & Schiffermüller], 1775) – П. селена*	0,2	0,6	10	0,1	0,4	5	0,1	0,5	7	0,4	1,1	13	0,5	1,2	21
<i>Pararge maera</i> (Linnaeus, 1758) – Бархатка большая*	–	–	–	–	–	–	0,1	0,5	7	–	–	–	0,3	1,0	7
<i>P. petropolitana</i> (Fabricius, 1787) – Б. петербургская*	–	–	–	0,1	0,4	5	–	–	–	–	–	–	0,3	0,7	14
<i>Coenonympha tullia</i> – Сенница болотная	0,5	0,9	30	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
<i>C. pamphilus</i> (Linnaeus, 1758) – С. обыкновенная*	0,5	1,2	20	–	–	–	0,1	0,5	7	0,4	0,8	20	0,4	1,1	14
<i>Aphantopus hyperantus</i> (Linnaeus, 1758) – Глазок цветочный	–	–	–	–	–	–	0,1	0,5	7	0,6	1,6	20	0,1	0,5	7
<i>Erebia ligea</i> (Linnaeus, 1758) – Чернушка кофейная	0,2	0,6	10	0,2	0,6	11	1,0	1,7	33	0,6	1,6	20	1,1	3,0	21
<i>Oeneis jutta</i> (Hübner, [1806]) – Сатир болотный*	0,2	0,6	10	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–

Таблица 2

Характеристики биотопических группировок чешуекрылых

Показатель		Сфагновые болота, n = 11, *n = 55	Сосняки, n = 19, *n = 171	Лиственные леса, n = 15, *n = 105	Луга, n = 15, *n = 105	Придорожные биотопы, n = 14, *n = 91
Число видов	M	3,5	2,2	4,8	7,1	5,6
	S	2,4	1,4	2,4	2,5	2,8
Плотность населения, экз./га	M	8,7	5,4	14,7	27,2	21,1
	S	6,6	4,1	10,4	14,5	13,1
Общность группировок, евклидово расстояние	M	0,137	0,104	0,209	0,313	0,262
	S	0,040	0,043	0,103	0,093	0,100
Видовое разнообразие, индекс Шеннона	M	0,55	0,37	0,71	0,89	0,77
	S	0,32	0,26	0,24	0,16	0,22
Видовое разнообразие, индекс Бергера – Паркера	M	0,53	0,72	0,40	0,27	0,37
	S	0,33	0,31	0,20	0,07	0,17

Примечание. n – число группировок, *n – число сравниваемых пар для оценки общности группировок, M – средняя арифметическая, S – стандартное отклонение.

Ординация объектов показывает, что виды расположились вдоль оси рассматриваемой компоненты согласно частоте их встречаемости (рис. 2). Наименьшие значения получили редкие виды, такие как толстоголовка палаемон и махаон, а наибольшие значения остались за доминантами – малинницей, репейницей и крапивницей. Информативность второй компоненты оценена в 16 %. И хотя формально она незначима (дисперсия

меньше 1), без учета содержащейся в ней информации анализ нельзя признать полным. Именно здесь проявилась тенденция к противопоставлению группировок бабочек, формирующихся на болотах и в сосняках, луговым группировкам. Таким образом, первая ось описывает встречаемость видов в условиях северной тайги, общую структуру фауны, а вторая намечает направления биотопической дифференциации населения.

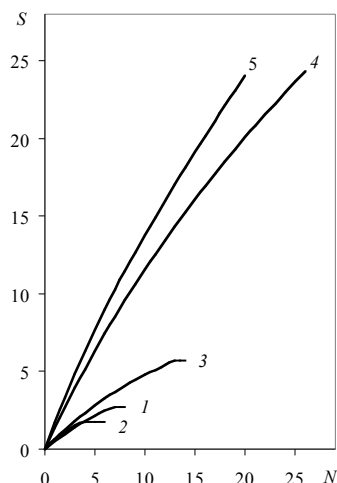


Рис. 1. Насыщенность видами биотопических группировок чешуекрылых: 1 – сфагновые болота, 2 – сосняки, 3 – лиственные леса, 4 – луга, 5 – придорожные биотопы. N – число особей, S – число видов

Таблица 3

Факторные нагрузки и дисперсии главных компонент

Биотопические группировки	ГК-1	ГК-2
Сфагновые болота	0,389	-0,587
Сосняки	0,430	-0,480
Лиственные леса	0,495	0,096
Луга	0,426	0,575
Придорожные биотопы	0,488	0,292
Дисперсия	3,75	0,81
Дисперсия, %	75,0	16,2

Примечание. ГК – главная компонента.

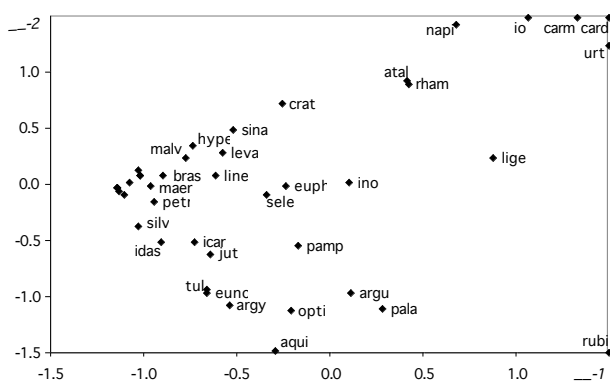


Рис. 2. Ординация чешуекрылых в осях главных компонент: виды обозначены первыми буквами их латинского названия, для обозначения *V. cardui* принято сокращение card, для *A. cardamines* – carm. У видов, помещенных на границы диаграммы, уменьшены значения соответствующих главных компонент. Эллипсом выделена группа видов, включающая *C. palaemon*, *P. machaon*, *P. rapae*, *H. virgaurea*, *A. eumedon*, *C. semiargus*, *L. populi*, *N. antiopa* и *P. c-album*

ОБСУЖДЕНИЕ

46 видов булавоусых чешуекрылых, найденных в окрестностях г. Костомукши, составляют 77 % всех видов, известных из северной тайги Карелии [3]. Лишь 14 видов не отмечены нами на исследуемой территории. Прежде всего это толстоголовка северная (*Pyrgus centaureae* (Rambur, 1839)), червонец голубоватый (*Lycaena helle* ([Dennis&Schiffermüller], 1775)), голубянка никия (*Aricia nicias* (Meigen, 1830)), перламутровки фрея (*Clossiana freija* (Becklin in Thunberg, 1791)) и фригга (*C. frigga* (Becklin in Thunberg, 1791)), типичные виды для местных условий, но имеющие локальное распространение [13]. Остальные виды северотаежной фауны – толстоголовка-запятая (*Hesperia comma* (Linnaeus, 1758)), зефир березовый (*Thecla betulae* (Linnaeus, 1758)), червонцы пятнистый (*Lycaena phlaeas* (Linnaeus, 1761)) и щавелевый (*L. hippothoe* (Linnaeus, 1758)), перламутровки аглая (*Argynnis aglaja* (Linnaeus, 1758)) и полевая (*Issoria lathonia* (Linnaeus, 1758)), шашечница аталия (*Melitaea athalia* (Rottemburg, 1775)), сенница луговая (*Coenonympha glycerion* (Borkhausen, 1788)) и чернушка дика (*Erebia disa* (Becklin in Thunberg, 1791)) отмечены для сопредельных районов по немногим находкам [27]. Впервые на исследуемой территории зарегистрирован 31 вид. Почти все эти бабочки известны для запада северной тайги по опубликованным данным. Находку непарного и бурого червонцев мы склонны рассматривать как результат случайного заноса, поскольку северные границы их ареалов проходят на 300–500 км южнее [22]. Тем не менее нельзя полностью исключать и возможность естественного проникновения этих видов на север в результате экспансии, которую в последние годы наблюдали у многих чешуекрылых [26], [30]. В целом же результаты исследования свидетельствуют о бедности северотаежной фауны дневных бабочек. С одной стороны, это связано с тем, что распространение ряда обычных для Карелии видов в северном направлении ограничено 62–63° с. ш. Те из них, что проникают в северную тайгу, попадают крайне редко. С другой стороны, нет здесь и арктических бабочек, которые не встречались бы в среднетаежных провинциях. Исключение составляют лишь чернушка дика, известная из района Калевалы, и северная форма толстоголовки-запятой (f. geogr. *catena*), указанная для Соловецкого архипелага [27].

Количественные оценки населения булавоусых чешуекрылых исследуемой территории оказались существенно ниже, чем в среднетаежных ландшафтах: например, средняя частота встреч имаго в местообитаниях Прионежья составляла 57 экз./га [15] против 15 экз./га в рассматриваемом случае. Низкое обилие дневных бабочек обусловлено, по-видимому, не только природно-климатическими особенностями рассматриваемого района, но и крайне неблагоприятными

ятными для развития большинства видов погодными условиями в летние месяцы 2007–2008 годов [4]. Преобладание малинницы и крапивницы характерно и для южных провинций Карелии, другие доминантные виды среднетаежных ландшафтов – бряквенница, крушинница, перламутровка-таволжанка, глазок цветочный и чернушка кофейная – на исследуемой территории попадались гораздо реже. Высокая численность репейницы – явление в наших широтах редкое, обусловленное интенсивной миграцией особей на север в годы с теплым летом. В такие сезоны в таежных местообитаниях чаще встречаются и другие мигранты (адмирал, дневной павлиний глаз и т. д.).

Бабочки очень неравномерно размещены по исследуемой территории, так же как и в средней тайге, населяя лишь более или менее открытые местообитания – болота, луга, поляны, просеки, вырубки и обочины дорог. Однако северотаежные группировки булавоусых чешуекрылых заметно беднее. Число видов, зарегистрированных в местообитании, здесь не превышает 11, тогда как в Северо-Западном Прионежье этот показатель достигает 21 вида [15], в Северном Приладожье – 38 [21], [25], а на юге Финляндии – 46 [18]. Наблюдаемое обеднение биотопических группировок происходит вследствие уменьшения встречаемости, а затем и полного выпадения видов из состава локальных фаун. Еще более заметно в северном направлении меняется плотность населения бабочек. В основных типах среднетаежных местообитаний среднее число зарегистрированных на трансектах особей составляло 45–101 [23], [29] и 35–88 экз./га [15], тогда как в северотаежных местообитаниях значение этого показателя не превышало 28 экз./га. Анализ структуры населения показал, что в северотаежных группировках чешуекрылых относительно высокую встречаемость имеют немногие виды, прежде всего те, что указаны в качестве доминирующих для исследуемой фауны. Используемые меры видового разнообразия вполне адекватно регистрируют выявленные градиенты. Значения энтропии Шеннона по сравнению с Прионежьем [15] снижаются с 1,6–2,27 до 0,37–0,88, а значения индекса доминирования Бергера – Паркера возрастают с 0,22–0,42 до 0,27–0,72. Вместе с тем иерархия биотопических группировок бабочек по числу видов, плотности населения и видовому разнообразию остается постоянной независимо от географического положения упомянутых районов: наиболее бедные группировки в условиях таежной зоны формируются в лесных и болотных местообитаниях, а наиболее богатые – на лугах. Лучшей иллюстрацией общей тенденции служат показанные на рис. 1 кривые насыщения группировок видами.

Биотопические предпочтения видов формируются под влиянием многих факторов,

важнейшими из которых являются наличие в достаточном количестве пищевых ресурсов и благоприятные мезо- и микроклиматические условия. Соответствие условий среды экологической специфике каждого вида обуславливает свойственное только ему биотопическое распределение. Одни виды на исследуемой территории сохраняют строгую приуроченность к очень узкому набору местообитаний. Примером могут служить сеница болотная, перламутровки северная и эвномия, которые в условиях лесной зоны облигатно связаны с болотными биоценозами [20]. Другие виды демонстрируют более равномерное биотопическое распределение, чем в среднетаежных ландшафтах. Некоторые из них, такие как желтушка торфянниковая, голубянка аргус, сеница обыкновенная, перламутровки таволжанка и селена, не обнаруживают значимой приуроченности ни к одному из рассматриваемых типов местообитаний, у малинницы биотопические предпочтения смещаются от болот к придорожным биотопам. Приуроченность многих бабочек к лугам и обочинам дорог объясняется прежде всего богатством растительности, в которой в достаточном количестве присутствуют кормовые растения гусениц и нектароносные растения для питания имаго. Болота и сосновые леса вследствие специфичности среды наименее благоприятны для развития дневных бабочек, поэтому к этим местообитаниям тяготеют немногие виды.

Обобщающий анализ размещения чешуекрылых не выявил значимых трендов изменчивости населения исследуемой территории, деления их на лесные, болотные и луговые, как ранее было показано для среднетаежных ландшафтов [15], [24]. Метод главных компонент зафиксировал лишь тенденцию пространственной дифференциации населения. При этом многочисленные виды обнаружили тяготение к тем же типам биотопов, что и в средней тайге. Даже малинница, анализ размещения которой показал приуроченность к придорожным биотопам, здесь попала в категорию лесных и болотных видов, каким по сути и является. Это связано с тем, что взаиморасположение видов в осях главных компонент, отражая корреляционные связи между биотопическими группировками, определяется не столько абсолютными значениями плотности, сколько участием вида в формировании структуры населения местообитаний. Причины отсутствия явных трендов кроются в особенностях природно-климатических условий района исследований. Во-первых, здесь относительно мало лугов и луговые виды бабочек вынуждены использовать все более или менее подходящие для существования открытые местообитания, в том числе и лесные. Во-вторых, отсутствует четкое разграничение между растительным покровом болотных и лесных местообитаний;

под пологом леса, на полянах и просеках присутствует целый ряд типичных болотных растений – обычное явление для северной тайги. Как следствие жесткость связи тирфобионтов и тирфофилов с болотами ослабевает. В-третьих, поскольку в северной тайге в силу климатических

условий численность дневных бабочек редко бывает высокой даже в наиболее благоприятных для развития местообитаниях, то и пространственное размещение большинства видов отличается большей выравненностью, чем их размещение на юге Карелии.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Болотов И. Н., Шутова Е. В. Закономерности формирования островных фаун булавоусых чешуекрылых (Lepidoptera, Diurna) на северном пределе распространения лесов в области плейстоценовых материковых оледенений (на примере островов Белого моря) // Известия РАН. Сер. биологическая. 2006. Вып. 3. С. 327–336.
2. Волков А. Д., Громцев А. Н., Еруков Г. В. и др. Экосистемы ландшафтов запада северной тайги (структура, динамика). Петрозаводск, 1995. 194 с.
3. Горбач В. В., Резниченко Е. С. Видовой состав и распространение дневных бабочек (Lepidoptera, Diurna) в Юго-Восточной Финноскандии // Ученые записки Петрозаводского государственного университета. Сер. «Естественные и технические науки». 2009. № 7 (101). С. 31–39.
4. Горбач В. В., Сааринен К., Резниченко Е. С. К экологии тополевого ленточника *Limnitis populi* (Lepidoptera, Nymphalidae) Восточной Финноскандии // Зоологический журнал. 2010. Т. 89. № 11. С. 1340–1349.
5. Коросов А. В. Специальные методы биометрии. Петрозаводск: Изд-во ПетрГУ, 2007. 364 с.
6. Коросов А. В., Горбач В. В. Компьютерная обработка биологических данных. Петрозаводск: Изд-во ПетрГУ, 2010. 84 с.
7. Мэгарран Э. Экологическое разнообразие и его измерение. М.: Мир, 1992. 181 с.
8. Полевой А. В., Хумала А. Э. Насекомые // Материалы инвентаризации природных комплексов и научное обоснование ландшафтного заказника «Сыроватка». Петрозаводск: Карельский научный центр РАН, 2003. С. 67–72.
9. Романов А. А. О климате Карелии. Петрозаводск: Госиздат КАССР, 1961. 140 с.
10. Свиридов А. В. Чешуекрылые (Lepidoptera, Macrolepidoptera) окрестностей Беломорской биологической станции Московского государственного университета и их стациальное распределение // Энтомологическое обозрение. 1970. Т. 49. Вып. 3. С. 365–372.
11. Хумала А. Э. Изучение энтомофауны островных экосистем Онежской губы Белого моря // Природное и культурное наследие Северной Финноскандии. Петрозаводск: Карельский научный центр РАН, 2003. С. 83–89.
12. Хумала А. Э., Полевой А. В. К фауне насекомых Карельского побережья и островов Белого моря // Инвентаризация и изучение биологического разнообразия на Карельском побережье Белого моря. Петрозаводск, 1999. С. 106–113.
13. Шутова Е. В., Антонова Е. М., Свиридов А. В., Кутенкова Н. Н. Чешуекрылые Кандалакшского заповедника // Флора и фауна заповедников СССР. Вып. 80. М., 1999. 48 с.
14. Яковлев Е. Б., Хумала А. Э., Полевой А. В. Насекомые // Инвентаризация и изучение биологического разнообразия на территории центральной Карелии. Петрозаводск: Карельский научный центр РАН, 2001. С. 149–158.
15. Gorbach V. V., Saarinen K. The butterfly assemblages of Onega Lake Area in Karelia, middle taiga of NW Russia (Hesperioidea, Papilionoidea) // Nota lepid. 2003. Vol. 25. P. 267–279.
16. Gotelli N., Colwell R. Quantifying biodiversity: procedures and pitfalls in measurement and comparison of species richness // Ecology Letters. 2001. Vol. 4. P. 379–391.
17. Heikkilä R., Lindholm T. Biodiversity and conservation of boreal nature. Kainuu, 2003. P. 187–192.
18. Kuussaari M., Heliölä J., Salminen J., Niininen I. Maatalousympäristön päiväperhosseurannan vuoden 2000 tulokset // Baptria. 2001. Vol. 26. P. 69–80.
19. Leinonen R., Itämes J., Kutenkova N. Lepidoptera of the Nature Reserve Friendship // Ecosystems, fauna and flora of the Finnish-Russian Nature Reserve Friendship. Helsinki: The Finnish Environment, 1997. P. 235–256.
20. Mikkola K., Spitzer K. Lepidoptera associated with peatlands in central and northern Europe: a synthesis // Nota lepid. 1983. Vol. 6. P. 216–229.
21. Saarinen K. A comparison of butterfly communities along field margins under traditional and intensive management in SE Finland // Agriculture, Ecosystems and Environment. 2002. Vol. 90. P. 59–65.
22. Saarinen K., Gorbach V. V. Erikoisia kultasiipiä itärajan tuntumassa // Baptria. 2007. Vol. 32. P. 15.
23. Saarinen K., Jantunen J. A comparison of butterfly fauna of agricultural habitats under different management history in Finnish and Russian Karelia // Ann. Zool. Fenn. 2002. Vol. 39. P. 173–181.
24. Saarinen K., Marttila O., Jantunen J. Species richness and distribution of butterflies (Lepidoptera: Hesperioidea, Papilionoidea) in agricultural environment in SE Finland // Entomol. Fenn. 1998. Vol. 9. P. 9–18.
25. Saarinen K., Valtanen A., Jantunen J., Saarnio S. Butterflies and diurnal moths along road verges: Does road type affect diversity and abundance? // Biol. Conserv. 2005. Vol. 123. P. 403–412.
26. Parmesan C., Ryrholm N., Stefanescu C. et al. Poleward shifts in geographical ranges of butterfly species associated with regional warming // Nature. 1999. Vol. 399. P. 579–583.
27. Peltonen O. Vientien perhosfaunasta // Ann. Entomol. Fenn. 1947. Vol. 13. S. 131–144.
28. Pollard E., Yates T. J. Monitoring butterflies for ecology and conservation. The British butterfly monitoring scheme. London: Chapman & Hall, 1993. 274 p.
29. Väisänen R. Distribution and abundance of diurnal Lepidoptera on a raised bog in southern Finland // Ann. Zool. Fenn. 1992. Vol. 29. P. 75–92.
30. Warren M. S., Hill J. K., Thomas J. A. et al. Rapid responses of British butterflies to opposing forces of climate and habitat change // Nature. 2001. Vol. 414. P. 65–69.

ЕЛЕНА АЛЕКСАНДРОВНА ШУЙСКАЯкандидат биологических наук, преподаватель кафедры ботаники и физиологии растений эколого-биологического факультета, Петрозаводский государственный университет
*elenashuy@rambler.ru***ГАЛИНА СТАНИСЛАВОВНА АНТИПИНА**доктор биологических наук, профессор кафедры ботаники и физиологии растений эколого-биологического факультета, Петрозаводский государственный университет
antipina@petrsu.ru

СИНАНТРОПНАЯ ФЛОРА ЮЖНОЙ КАРЕЛИИ

Показано высокое видовое разнообразие синантропной флоры Южной Карелии (797 видов). Установлено, что аборигенный апофитный компонент (302 вида) сохраняет таксономические, биоморфологические, географические и экологические параметры бореальной флоры, а показатели адвентивного компонента (495 видов) сходны с параметрами флор более южных регионов.

Ключевые слова: синантропная флора, аборигенный вид, вид-апофит, адвентивный вид, местообитание, Южная Карелия

Оценка современного состояния и тенденций изменения флоры Карелии основана на знании зонально-региональной специфики синантропной флоры. Флора Карелии изучается в течение многих лет, но специального исследования и анализа синантропной флоры не проводилось.

Синантропизация флоры, то есть увеличение доли в ней синантропных видов, в наши дни носит глобальный характер и рассматривается как стратегия адаптации растительного мира к условиям среды, измененным или созданным в результате деятельности человека [15]. Синантропная флора объединяет виды, связанные с деятельностью человека, и состоит из двух флорогенетических элементов – аборигенного апофитного и адвентивного [14], [16]. К видам-апофитам относятся аборигенные виды, произрастающие в местообитаниях, испытывающих антропогенную нагрузку [6], [19]. Адвентивные виды – заносные, проникшие на данную территорию в результате деятельности человека при непреднамеренном заносе или при дичании из культуры [4], [11], [20].

Синантропные виды имеют большое значение для региона: заселяя самые разнообразные вторичные антропогенные местообитания, они формируют на них растительный покров и выполняют защитную роль.

Исследование выполнено в 2006–2009 годах в Южной Карелии, которая соответствует южной агроклиматической зоне республики [1]. Изученная территория включает Лахденпохский, Сортавальский, Питкярантский, Олонецкий, Суоярвский, Пряжинский, Прионежский, Кондопожский, Медвежьегорский и Пудожский районы, Петрозаводский городской округ. Она расположена в 7 флористических районах Карелии: Олонецком, Приладожском, Суоярвском, Заонежском, Выгозерском, Водлозерском и Пудожском [6], [12].

Изучение синантропной флоры проводили маршрутным методом. Маршруты охватывали все типы синантропных местообитаний: транспортные, селитебные, рудеральные, сегетальные, промышленные, культурные, нарушенные луговые участки, карьеры, вторичные водоемы. Анализ проведен по общепринятым параметрам [13], [17]. Схема соответствует методическим рекомендациям [3], [10], [16]. Число видов флоры Южной Карелии определено по литературным данным [6].

Синантропная флора Южной Карелии характеризуется высоким видовым разнообразием: в ней выявлены 797 видов растений, принадлежащих к 395 родам, 92 семействам, 59 порядкам, 5 классам и 4 отделам. В составе синантропной флоры представлены 302 аборигенных вида-апофита и 495 адвентивных видов.

Одним из показателей антропогенной трансформации флоры региона является индекс синантропности (доля синантропных видов в общем числе видов флоры). Для флоры Южной Карелии он составляет 0,68, что соответствует флорам других регионов Севера России [5], [8], [18].

Индекс апофитности (доля апофитов в составе синантропного компонента флоры) составляет 0,38. Надо отметить, что основная часть апофитов флоры Карелии представлена в исследованном районе. Дальнейшее расширение комплекса синантропных видов будет происходить за счет адвентивных видов – заноса видов-индукторов и дичания видов-интродукторов. Индекс адвентивности (доля адвентивных видов в составе синантропного компонента флоры) составляет 0,62. Преобладание адвентивных видов является характерной чертой синантропной флоры Южной Карелии. Об общей тенденции увеличения индекса адвентивности флоры свидетельствуют и литературные данные [2], [8], [9].

Ведущими семействами (рис. 1) синантропной флоры Южной Карелии являются

Asteraceae (101 вид), *Poaceae* (82), *Rosaceae* (63), *Brassicaceae* (48), *Fabaceae* (39), *Caryophyllaceae* (32), *Polygonaceae* (31), *Lamiaceae* (31), *Cyperaceae* (27), *Scrophulariaceae* (24). Их доля в составе синантропной флоры составляет 60 %. Несмотря на традиционные представления о семействе *Cyperaceae* как представленном преимущественно индигенными видами, многие его виды в условиях Южной Карелии проявляют признаки апофитности.

Значения индекса *Asteraceae* / *Poaceae* для видов-апофитов (0,8) соответствует бореальной зоне (0,6–1,5) [17], а для адвентивного компонента индекс выше (1,7) за счет интенсивного заноса новых видов и дичания из культуры видов-интродуцентов семейства *Asteraceae*.

В спектрах жизненных форм синантропной флоры сохраняются пропорции, присущие региональной флоре Карелии. Анализ показал преобладание в апофитном компоненте травянистых многолетников, гемикриптофитов, в адвентивном – малолетников и травянистых многолетни-

ков, гемикриптофитов и терофитов (рис. 2). Повышение доли фанерофитов среди адвентивных видов связано с дичанием из культуры древесных интродуцентов, например *Populus alba* L., *Spirea alba* Du Roi, *Hippophaë rhamnoides* L., *Syringa × henryi* C. K. Schneider, *Lonicera tatarica* L. и др.

Для синантропной флоры характерно преобладание умеренного широтного и евразийского долготного географических элементов (рис. 3). Умеренный (бореальный) характер апофитной флоры определяется географическим положением Южной Карелии в среднетаежной подзоне. В адвентивном компоненте флоры отмечается преобладание умеренных и южно-умеренных широтных, евразийских и европейских долготных элементов. Именно умеренные и южно-умеренные зоны Евразии являются главным источником поступления заносных видов на территорию республики. Разнообразие искусственно созданных местообитаний, широкий ассортимент видов растений, выращиваемых в культуре, обеспечивают расселение многих адвентивных видов.

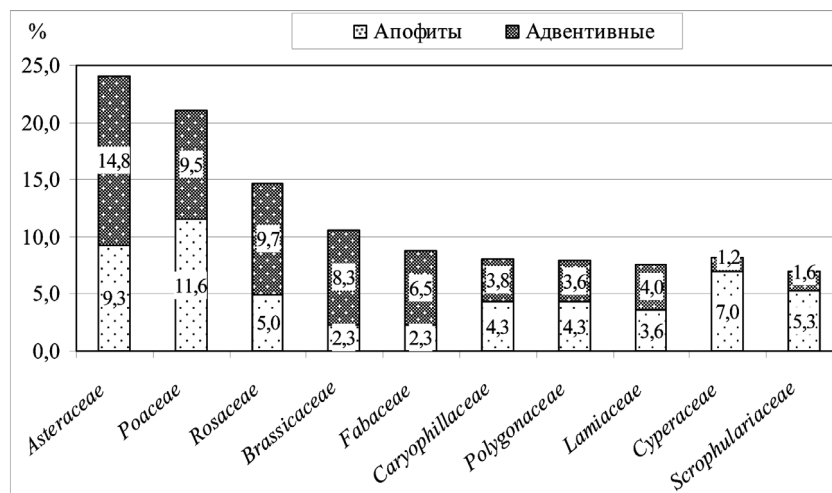


Рис. 1. Спектр ведущих семейств синантропной флоры Южной Карелии

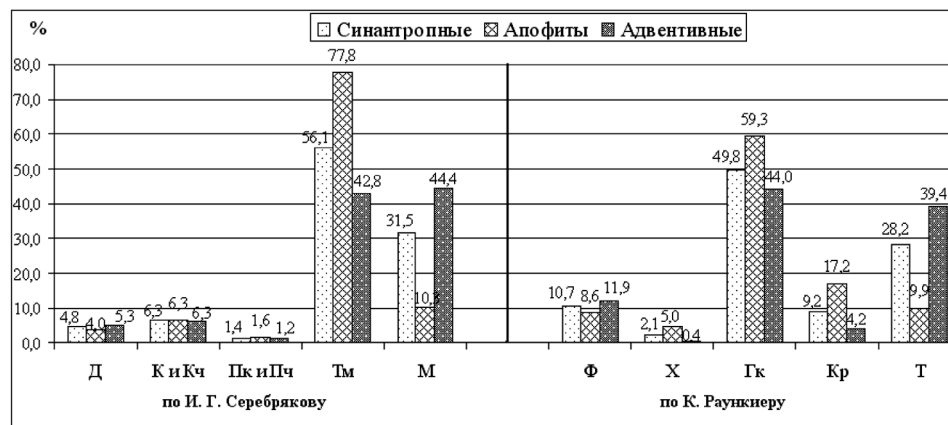


Рис. 2. Соотношение жизненных форм: по И. Г. Серебрякову (Д – деревья, К и Кч – кустарники и кустарнички, Пк и Пч – полукустарники и полукустарнички, Тм – травянистые многолетники, М – малолетники); по К. Раушкиеру (Ф – фанерофиты, Х – хамефиты, Гк – гемикриптофиты, Кр – криптофиты, Т – терофиты)

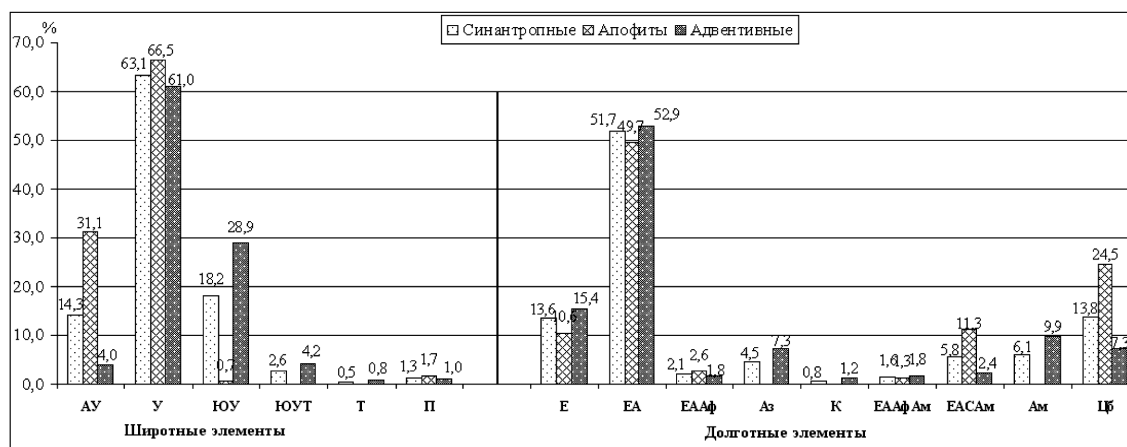


Рис. 3. Соотношение географических элементов: широтные (АУ – арктическо-умеренные, У – умеренные, ЮУ – южно-умеренные, ЮУТ – южно-умеренно-тропические, Т – тропические, П – плюризональные); долготные (Е – европейские, ЕА – евразийские, ЕААф – евразийско-африканские, Аз – азиатские, К – кавказские, ЕААфАм – евразийско-африкано-американские, ЕАСАм – евразийско-северо-американские, Ам – американские, Цб – циркумбореальные)

Это, например, североамериканские (*Eschscholzia californica* Cham., *Aster × salignus* Willd. и др.), евразийско-африканские (*Hyoscyamus niger* L., *Setaria verticillata* (L.) P. Beauv. и др.), азиатские (*Caragana arborescens* Lam., *Rosa rugosa* Thunb. и др.) виды.

По отношению к увлажнению среди апофитов и адвентивных видов преобладают мезофиты (рис. 4). В апофитном компоненте достаточно высока доля гигрофитов за счет видов семейств *Cyperaceae*, *Juncaceae*, *Poaceae*, представленных во вторичных водоемах, канавах. Увеличение участия ксерофитов, характерное для более южных регионов [15], нами не отмечено, так как присутствие мезофитных и гигрофитных видов обеспечивает сохранение гидротипической структуры, присущей флоре региона. По отношению к трофности почв большинство видов синантропной флоры принадлежит к группе мезотрофов. Характер освещенности синантропных местообитаний благоприятствует произрастанию гелиофитов. Достаточно высокое участие семигелиофитов в апофитном комплексе связано с видами семейств *Juncaceae*, *Cyperaceae* и *Poaceae*, приуроченных к нарушенным берегам и лесным опушкам.

По успешности заселения синантропных местообитаний [6] среди апофитов выделены следующие группы: эвапофиты – виды, положительно реагирующие на действие антропогенных факторов (35 %), гемиапофиты – виды, приобретающие умеренную выгоду в связи с антропогенным преобразованием местообитаний (37 %), и олигоапофиты – виды, редко встречающиеся в синантропных местообитаниях (28 %). Многие считающиеся индигенными виды проявляют в условиях региона признаки апофитности. Среди них надо отметить, например, виды семейства *Orchidaceae* (*Dactylorhiza incarnata* (L.) Soó, *D. maculata* (L.) Soó s. l.), которые успешно рас-

тут на нарушенных луговых участках и вдоль канав у обочин дорог.

Анализ по времени заноса на новую территорию показал, что главной группой являются неофиты (84 %). Новейшие элементы представлены дичающими из культуры (*Callistephus chinensis* (L.) Ness, *Syringa josikaea* Jacq. f. ex. Rchb. и др.) и случайными заносными (*Medicago sativa* L., *Ambrosia artemisiifolia* L. и др.) видами. Группу археофитов (16 %) представляют сорные растения (*Alsinia media* L., *Fallopia convolvulus* (L.) A. Löve и др.). По способам заноса основная часть адвентивных видов принадлежит к группе ксенофитов (60 %), то есть видам, которые заносятся непреднамеренно (*Spergula sativa* Boenn., *Avena fatua* L. и др.). Распространение эргазиофитов (33 %) – видов, дичающих из культуры (*Malus domestica* Borkh., *Rosa spinosissima* L. и др.), приурочено главным образом к паркам, скверам, дворам. Ряд видов (7 %) мы рассматриваем как аколофиты, то есть виды, которые распространяются за счет своих эколого-биологических особенностей (*Trifolium repens* L., *Bromopsis inermis* (Leyss.) Holub и др.). Надо отметить, что отнесение вида к этой группе оказывается достаточно сложным и небесспорным.

По результатам внедрения преобладают эфемерофиты (39 %), представляющие непостоянный компонент флоры (*Eschscholzia californica*, *Vaccaria pyramidata* Medik. и др.). Группа эпикофитов (36 %) (*Chenopodium polyspermum* L., *Brassica campestris* L. и др.) объединяет виды, распространяющиеся в нарушенных местообитаниях. Третья по числу видов группа – колонофиты (24,8 %), они расселяются вегетативным путем в месте заноса и не распространяются на прилегающие участки (*Vicia segetalis* Thuill., *Rudbeckia laciniata* L. и др.). Группа агриофитов (0,2 %), внедряющихся в естественные сооб-

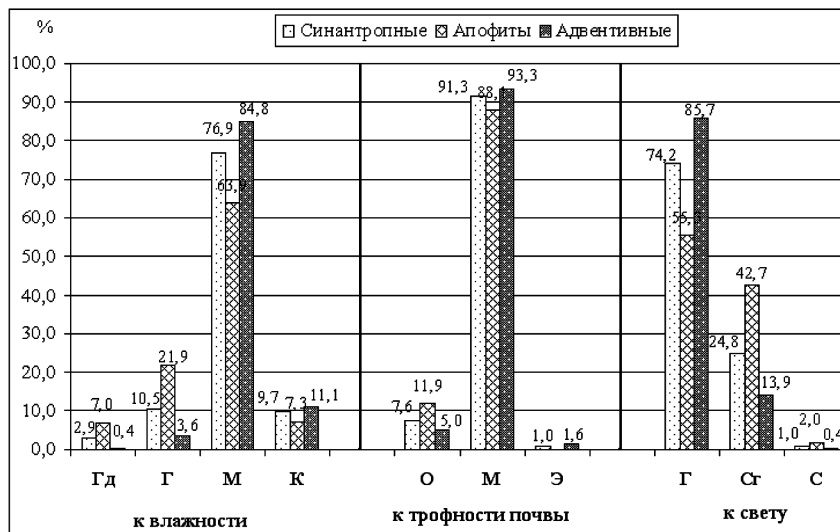


Рис. 4. Экологические группы: по отношению к влажности (Гд – гидрофиты, Г – гигрофиты, М – мезофиты, К – ксерофиты); по отношению к трофности почвы (О – олиготрофы, М – мезотрофы, Э – эвтрофы); по отношению к свету (Г – гелиофиты, Сг – семигелиофиты, С – сциофиты)

щества, представлена одним видом – *Elodea canadensis* Mishx.

Наибольшим видовым разнообразием ценофлоры характеризуются транспортные местообитания, условия которых обеспечивают возможность распространения и произрастания различных видов растений (рис. 5).

Ряд видов являются общими практически для всех типов местообитаний и встречаются в ценофлорах часто или обыкновенно, формируя основу синантропной флоры. Это 14 видов-апофитов (*Equisetum arvense* L., *Ranunculus acris* L., *Rumex acetosella* L., *Aegopodium podagraria* L., *Heracleum sibiricum* L., *Linaria vulgaris* Mill., *Taraxacum officinale* Wigg. s. l., *Tussilago farfara*, *Elytrigia repens* (L.) Nevski, *Poa pratensis* L. и др.) и 15 адвентивных видов (*Alsine media*, *Capsella bursa-pastoris* (L.) Medik., *Trifolium pratense* L., *Plantago major* L., *Artemisia vulgaris* L., *Cirsium setosum* (Willd) Bess, *Tripleurospermum inodorum* (L.) Sch. Bip., *Poa annua* L. и др.). При ограниченном составе массовых синантропных видов (29, около 4 % общего списка) их средообразующая роль в зарастании нарушенных участков велика, они формируют обширные, часто монодоминантные заросли.

В рудеральных местообитаниях Прионежского района отмечены единичные находки карантинных видов *Ambrosia artemisiifolia* и *A. trifida* L., которые в 2008 году цвели, но не сформировали плодов.

Особого внимания заслуживают гималайский вид *Impatiens glandulifera* Royle и кавказский вид *Heracleum sosnovskyi* Manden. Распространение этих видов, которые первоначально возделывались в культуре, является примером экспансии новых для Севера видов, активного их расселения с занятием новых биотопов и эко-

логических ниш, что можно рассматривать как биологическое загрязнение окружающей среды северного региона.

Впервые для Южной Карелии отмечены заносные евразийские виды: *Agropyron desertorum* (Fisch. ex Link) Schult., встречающийся на обочине дороги в центре г. Петрозаводска, и *Trifolium alpestre* L., выявленный на железнодорожных путях в г. Сортавале. Ряд адвентивных видов указан впервые для того или иного флористического района Карелии. Это, например, *Lotus corniculatus* L. s. l. (Суоярвский, Олонецкий районы), *Medicago sativa* (Пудожский район), *Lapsana communis* L. (Сортавальский, Питкярантский районы), *Aster novi-belgii* L. (города Пудож, Петрозаводск), *Rudbeckia hirta* L. (г. Пудож).

В синантропных местообитаниях встречены 16 редких видов, внесенные в Красную книгу Республики Карелия (2007 год) [7] с категорией «редкие» (*Larix archangelica* Laws., *Delphinium elatum* L., *Ranunculus reptabundus* Rupr., *Thalictrum lucidum* L., *Salix acutifolia* Willd., *S. triandra* L., *Ulmus glabra* Huds., *U. laevis* Pall., *Humulus lupulus* L., *Polygala vulgaris* L., *Swida alba* (L.) Opiz, *Kadenia dubia* (Schkuhr) Laurova & Tichomir., *Pseudolysimachion spicatum* (L.) Opiz., *Campanula latifolia* L., *C. trachelium* L., *Carex vulpina* L.).

Современная синантропная флора Южной Карелии отражает антропогенные процессы в региональной флоре, а ее нынешнее состояние представляет собой один из моментов истории флоры региона. Находясь в зависимости от хозяйственной деятельности, синантропные виды являются индикаторами антропогенной трансформации природно-территориальных комплексов и окружающей среды.

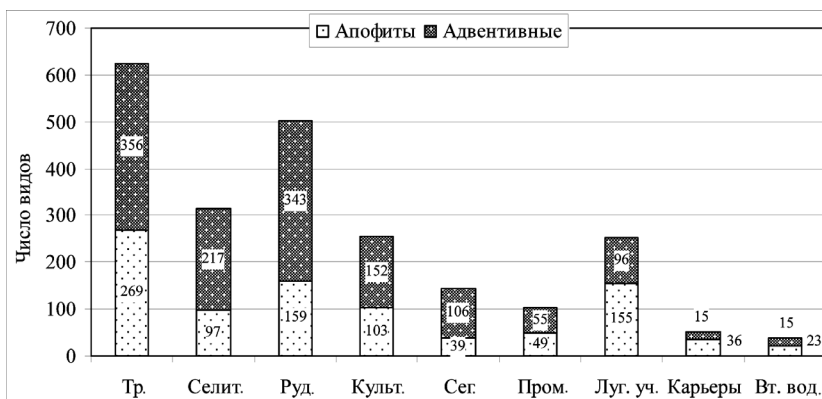


Рис. 5. Видовое богатство ценофлор синантропной флоры Южной Карелии (Тр – транспортные, Селит – селитебные, Руд – рудеральные, Культ – культурные, Сег – сеgetальные, Пром – промышленные местообитания, Луг. уч. – нарушенные луговые участки, Вт. вод. – вторичные водоемы)

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Атлас Карельской АССР. М.: Изд-во ГУГК, 1989. 40 с.
2. Борисова Е. А. Адвентивная флора Верхневолжского региона: Автореф. дис. ... д-ра биол. наук. М., 2008.
3. Гнатюк Е. П., Антипина Г. С. Методы сбора и анализа флористических данных // Методы полевых и лабораторных исследований растений и растительного покрова. Петрозаводск, 2001. С. 126–146.
4. Изучение биологического разнообразия методами сравнительной флористики: Материалы IV рабочего совещ. по сравнительной флористике, Березинский биосферный заповедник, 1993. СПб.: Изд-во СПбГУ, 1998. 356 с.
5. Костина В. А. Синантропная флора Мурманской области // Биоразнообразие, охрана и рациональное использование растительных ресурсов Севера: Материалы XI Перфильевских научных чтений, посвященных 125-летию со дня рождения Ивана Александровича Перфильева (1882–1942), Архангельск, 23–25 мая 2007 г. Ч. 1. Архангельск, 2007. С. 76–79.
6. Кравченко А. В. Конспект флоры Карелии. Петрозаводск: Карельский научный центр РАН, 2007. 403 с.
7. Красная книга Республики Карелия. Петрозаводск: Карелия, 2007. 368 с.
8. Максимов А. А. Флора города Архангельска: Автореф. дис. ... канд. биол. наук. М., 2006. 28 с.
9. Миркин Б. М., Наумова Л. Г. Адвентизация растительности в призме идей современной экологии // Журнал общей экологии. 2002. Т. 63. № 6. С. 500–508.
10. Особенности изучения флоры территорий, преобразованных деятельностью человека // Теоретические и методические проблемы сравнительной флористики. Л.: Наука, 1987. С. 234–236.
11. Проблемы изучения адвентивной и синантропной флоры в регионах СНГ: Материалы науч. конф. М.: Изд-во Ботанического сада МГУ; Тула: Гриф и К°, 2003. 139 с.
12. Раменская М. Л. Анализ флоры Мурманской области и Карелии. Л.: Наука, 1983. 213 с.
13. Толмачев А. И. Введение в географию растений. Л.: Изд-во ЛГУ, 1974. 243 с.
14. Третьякова А. С., Мухин В. А. Флорогенетическая структура синантропной флоры среднего Урала // Сравнительная флористика на рубеже III тысячелетия. СПб.: Наука, 2000. С. 324–335.
15. Хмелев К. Ф., Березуцкий М. А. Состояние и тенденции развития флоры антропогенно-трансформированных экосистем // Журнал общей биологии. 2001. Т. 62. № 4. С. 339–351.
16. Шадрин В. А. Флористические параметры в оценке синантропизации флоры // Сравнительная флористика на рубеже III тысячелетия. СПб.: Наука, 2000. С. 288–300.
17. Шмидт В. М. Математические методы в ботанике. Л.: Изд-во ЛГУ, 1984. 156 с.
18. Шушпанникова Г. С. Синантропная флора таежных и тундровых территорий северо-востока Европейской России // Ботанический журнал. 2001. Т. 86. № 8. С. 28–36.
19. Rikli M. Die Anthropolochoren und der Formenkreis des *Nasturtium palustre* DC // Ber. Züricher Bot. Ges. 1903/1904. № 8. S. 71–82.
20. Thellung A. Zur Terminologie der Adventiv- und Ruderalflora // Allgemeine Bot. Zeitschrift. Syst. 1918/1919. H. 24–25. S. 36–42.

АНДРЕЙ ВИКТОРОВИЧ БУКАЛЁВ

кандидат медицинских наук, доцент, врач-патологоанатом, Республиканская больница им. В. А. Баранова (г. Петрозаводск)
max-andy@yandex.ru

ИРИНА АНАТОЛЬЕВНА ВИНОГРАДОВА

доктор медицинских наук, доцент, заведующий кафедрой фармакологии, организации и экономики фармации медицинского факультета, Петрозаводский государственный университет
iri89569627@yandex.ru

РОЛЬ ЭПИФИЗА В ОРГАНИЗМЕ

В статье рассматривается роль и значение эпифиза в организме в свете современных научных исследований. Приводятся данные по истории изучения, анатомии, гистологии и физиологии эпифиза. Обсуждаются вопросы геропротекторного и антиканцерогенного действия мелатонина и нейропептидов эпифиза и их роли в регуляции циркадианных ритмов организма и его антиоксидантной защите.

Ключевые слова: эпифиз, мелатонин, циркадианные ритмы

Открытия 50-х годов XX века в области биохимии и физиологии эпифиза вызвали повышенный интерес к этой железе. Внимание к эпифизу со стороны исследователей объясняется прежде всего широким спектром биологической активности его основного гормона – мелатонина и пептидов эпифиза, участвующих в регуляции нервной [13], [21], эндокринной и иммунной систем [1], [6], [12], [26]. Расширяются исследования, связанные с оценкой функции эпифиза, его гормонов и пептидов при разнообразных физиологических и патологических состояниях организма, а также в качестве составной части диффузной нейроиммуноэндокринной системы (ДНИЭС) [13].

Первое описание анатомии эпифиза было сделано александрийским врачом Герофилом за 300 лет до н. э., а название он получил от Галена (II век н. э.), который назвал эту железу шишковидным телом за внешнее сходство с сосновой шишкой.

Впоследствии в литературе появились описания патоморфологических изменений и гистологического строения шишковидного тела. Ж. Винслоу (1732), К. Бурдах (1882) относили шишковидное тело к нервным ганглиям. Г. Швальбе (1881) считал шишковидное тело железой. В начале XX века невролог О. Марбург предположил, что эпифиз выделяет какое-то вещество, угнетающее функции гипоталамуса и как следствие – развитие репродуктивной системы [13], [18].

Новая волна признания шишковидной железы начинается с конца 50-х годов прошлого столетия: в 1959 году А. Лернер с сотрудниками идентифицировал фактор, просветляющий пигментальные клетки головастика, из экстрактов пинеальных желез быка и назвал его мелатони-

ном [40]. С тех пор появились сотни научных работ, посвященных изучению самых разнообразных сторон действия эпифиза в организме. Вместе с тем очевидно и то обстоятельство, что эпифиз до сих пор остается наименее исследованным эндокринным органом. Современный этап в изучении эпифиза с полным основанием можно назвать этапом первых находок, определения феноменов и построения исходных концепций [28], [32].

Анатомически эпифиз расположен в задней части III желудочка в борозде между передними бугорками пластинки четверохолмия. Шишковидное тело представляет собой непарное округлое или шарообразное образование красновато-бурого цвета. Его величина и вес меняются с возрастом. Железа взрослого человека имеет длину 5–15 мм, ширину 3–10 мм, толщину 2–6 мм и массу около 170 мг. Вентральная, обычно более выпуклая поверхность эпифиза находится в своеобразном ложе, образованном бороздой, отделяющей друг от друга верхние холмики крыши среднего мозга [12], [18]. К дорсальной поверхности шишковидного тела прилежит надшишковидное углубление, или надпинеальный карман, который сообщается с полостью третьего желудочка. Над дорсальной поверхностью шишковидного тела нависают спайка свода и валик мозолистого тела [20].

Данные сравнительной анатомии и эмбриологии указывают на близкое родство эпифиза и теменного глаза. Первоначально существовали «первичные» боковые глаза в виде светочувствительных клеток первично нервной ленты. При погружении этой ленты вглубь тела и ее замыкании в нервную трубку «первичные» боковые глаза постепенно превращаются в «окончательные» боковые глаза с инвертированной

сетчаткой, то есть со светочувствительными клетками, воспринимающая поверхность которой повернута от света [18], [20].

Зачатки эпифиза появляются у эмбрионов человека на 6–7-й неделе внутриутробного развития [20]. Эпифиз в это время представляет собой выпячивание крыши промежуточного мозга, то есть является частью эпиталамуса. В дальнейшем происходит миграция этого выступа мозгового пузыря вглубь мозга и его дифференцировка в эпифиз [20]. Клеточная масса органа представлена спонгиозными областями, которые дают начало нейроглии: эпендиме, астроглии, олигодендроглии. В результате перемещений разных спонгиозных элементов (астроглии, олигодендроглии и эпендимы) формируется своеобразная пинеальная ткань. Позднее в эпифиз проникает микроглия. В 3,5 месяца эмбриона эпифиз вполне оформлен [21].

Шишковидная железа окружена мягкой мозговой оболочкой, которая формирует капсулу органа. Капсула и прослойки соединительной ткани построены из рыхлой волокнистой соединительной ткани, они образуют строму железы и разделяют ее паренхиму на дольки [21].

Пинеальная железа тесно связана со всеми диэнцефальными элементами, реализуя свои гуморальные связи через кровь и цереброспинальную жидкость. Система желудочков мозга позволяет гуморальным сигналам эпифиза достигать ядер гипоталамуса [1]. Большинство нервов эпифиза представлено волокнами клеток верхних шейных симпатических ганглиев [1], [20].

Гистологически паренхима шишковидной железы состоит из пинеальных и глиальных клеток. Кроме того, имеются периваскулярные фагоциты. В эпифизе находят два типа клеток: пинеалоциты (около 95 % клеток, большие, светлые клетки) и астроциты (глиальные клетки, темные, с овальными ядрами) [20].

Пинеалоциты и астроциты имеют длинные отростки. Пинеалоциты обнаруживаются во всех долях, располагаются преимущественно в центре – это секретирующие клетки. Они имеют большое овальное пузыревидное с крупными ядрышками ядро. От тела пинеалоцита отходят длинные отростки, которые переплетаются с отростками глиальных клеток. Отростки, булавовидно расширяясь, направляются к капиллярам и контактируют с ними. Пинеалоциты лучше всего демонстрируются при импрегнации серебром [39].

В цитоплазме пинеалоцитов обнаруживаются многочисленные митохондрии, хорошо развитый комплект Гольджи, лизосомы, пузырьки агранулярной эндоплазматической сети, рибосомы и полисомы. Пинеальные клетки большие, светлые, с крупными ядрами, многоугольной формы. К 10–15 годам жизни в них появляется пигмент (липохром) [39].

Морфологические проявления секреции шишковидной железы: внутриядерные бледно-базофильные включения пинеальных клеток, вакуолизация их цитоплазмы, базофильные или оксифильные капли коллоида в клетках. Секреторная активность в эпифизе стимулируется светом и темнотой [4].

Между секреторными клетками и фенистированными капиллярами располагаются глиальные клетки. Они преобладают на периферии долек. Эти клетки – мелкие, с компактной цитоплазмой, гиперхромными ядрами, многочисленными отростками. Глиальные клетки напоминают астроциты, имеют многочисленные ветвящиеся отростки, округлое плотное ядро, элементы гранулярной эндоплазматической сети и структуры цитоскелета [18], [40].

Иннервация эпифиза осуществляется симпатическими нервными волокнами верхних шейных узлов симпатического ствола, которые, подходя к шишковидному телу, образуют шишковидный нерв. В биохимическом отношении эпифиз млекопитающих является весьма активным органом, который вырабатывает ряд биогенных аминов (серотонин, мелатонин, норадреналин и гистамин), различные пептиды и ферменты, участвующие в превращении этих соединений [7], [40].

Таким образом, пинеалоциты эпифиза продуцируют гормоны, представленные двумя биохимическими типами молекул – биогенными аминами и регуляторными нейропептидами [1]. Мелатонин был открыт в 1958 году и является наиболее хорошо изученным гормоном эпифиза [1]. Роль эпифизарных регуляторных нейропептидов исследована в меньшей степени. К настоящему времени в пинеальной железе обнаружена экспрессия вазоинтестинального пептида (VIP), нейропептида Y (NPY), субстанции P, вазопрессина, бомбезина, опиоидных пептидов, гипофизарного активирующего аденилатциклазу пептида (РА-САР), эндотелина и др. [1].

Наличие в пинеалоцитах биогенных аминов, а также способность к захвату и декарбоксилированию их предшественников позволяет отнести клетки эпифиза к клеткам APUD-системы, являющейся составной частью ДНИЭС [15]. ДНИЭС – единая функциональная биологическая система, клетки которой расположены практически во всех висцеральных органах. Клетки ДНИЭС продуцируют биогенные амины и регуляторные пептиды, идентичные таковым в центральной нервной, иммунной, эндокринной системах, и выполняют роль местных регуляторов гомеостаза [12], [15].

Гормон эпифиза мелатонин, представляющий собой 5-метокси-N-ацетилтрипамин, является производным индола – серотонина. Начальным звеном биосинтеза мелатонина является триптофан, поступающий с пищей, затем происходят следующие превращения: 5-гидрокситриптофан

→ 5-гидрокситриптамин (серотонин) → N-ацетилсеротонин → мелатонин. Мелатонин быстро поступает в кровь и быстро из нее исчезает. В печени человека происходят его гидроксилирование и конъюгация с сульфатом и глюкуроновой кислотой с образованием 6-сульфатоксимелатонина (6-COMT) – главного метаболита, который выводится с мочой. Его суточная экскреция достоверно отражает продукцию мелатонина [11].

Активность ферментов, участвующих в превращении серотонина в мелатонин, подавляется освещением – вот почему биосинтез этого гормона происходит в темное время суток [4], [6], [22].

Мелатонин обладает широким спектром метаболических и гомеостатических свойств, в силу этого он сам и посредством своих метаболитов осуществляет важную функцию регуляторов процессов гомеостаза. Наиболее важными физиологическими проявлениями действия мелатонина являются усиление обменных процессов, влияние на пигментный обмен, регуляция суточных и сезонных ритмов, антигонадотропный эффект. Мелатонин также обладает пролиферотропным действием, модулируя дифференцировку и апоптоз клеток, он участвует в регуляции зрительной функции, повышает сопротивляемость организма стрессам и подавляет действие свободных радикалов [1], [13], [21].

Мелатонин стимулирует иммунный ответ как по В-, так и по Т-системе, но это действие зависит от исходного состояния иммунокомпетентных органов [15], [26], [39]. Между количеством лимфоцитов и уровнем мелатонина определяется обратная взаимосвязь, то есть прослеживается определенная адаптивная направленность в воздействии мелатонина на иммунитет [26], [39]. Большинство исследователей, изучавших возрастные особенности шишковидной железы, считают ее органом, подвергающимся постепенной инволюции. После 10-летнего возраста появляются признаки обызвестления, выражающиеся в отложении так называемого мозгового песка (*acervulus cerebri*) [1], [42]. Мозговой песок состоит из органической основы – коллоида, пронизанного углекислым и фосфорнокислым кальцием и магнием. Одновременно с возрастной перестройкой структуры шишковидной железы претерпевает изменения и ее сосудистая сеть. Мелкопетлистая, богатая анастомозами артериальная сеть, свойственная железе новорожденного, заменяется с возрастом продольными слабо ветвящимися артериями. Следует, однако, подчеркнуть, что специфическая паренхима железы сохраняется до глубокой старости. По-видимому, функциональная активность шишковидной железы с возрастом постепенно снижается, но не утрачивается полностью [21], [26], [36].

Отправные моменты физиологии эпифиза состоят в следующем. Мелатонин образуется

в клетках эпифиза и затем секретируется в кровь. Световая информация воспринимается глазами, передается в эпифиз по нейронам супрахиазматических ядер (СХЯ) гипоталамуса через ствол верхней грудной части спинного мозга и симпатические нейроны верхнего шейного ганглия. В темное время суток сигналы от СХЯ вызывают увеличение синтеза и высвобождения норадреналина из симпатических окончаний. Эпифиз здорового взрослого человека, имеющий массу немногим более 100 мг, ежедневно выделяет в кровь около 30 мкг мелатонина. Свет угнетает продукцию и секрецию мелатонина, и поэтому его максимальный уровень в эпифизе и в крови человека и животных наблюдается в ночные часы, а минимальный – в утренние и дневные [1], [5].

Необходимо отметить, что в организме присутствует и экстрапинеальный мелатонин, то есть синтезированный вне эпифиза. Честь открытия экстрапинеальной продукции мелатонина принадлежит российским ученым Н. Т. Райхлину и И. М. Кветному. В 1975 году они установили, что способностью синтезировать мелатонин обладают клетки червеобразного отростка кишечника [37].

Эпифиз с помощью мелатонина участвует в организации суточного периодизма и регуляции циклических процессов, выступая посредником между пейсмекерным механизмом ядер и периферическими органами. Он вместе с СХЯ гипоталамуса входит в систему биологических часов организма, играющих ключевую роль в механизмах старения [1], [3], [21], [40]. Физиологические функции эпифиза в организме весьма многообразны [18], [22], [21].

Удаление эпифиза приводит к практически полному исчезновению мелатонина из кровеносного русла. У эпифизэктомированных лабораторных животных (крыс) ускоряется половое созревание, продлевается овуляторная фаза цикла, наблюдается снижение уровня инсулина и толерантности к глюкозе, повышение уровня холестерина и свободных жирных кислот [20], [38]. У человека следствием эпифизэктомии (предпринятой в связи с развитием опухоли) является нарушение различных циркадианных ритмов, например водно-солевого обмена, повышение артериального давления и другие изменения [21].

Основными функциями эпифиза в организме являются: регуляция циркадианных и сезонных ритмов организма; регуляция репродуктивной функции; антиоксидантная защита организма; противоопухолевая защита. Есть основания полагать, что эпифиз является «солнечными часами старения» [1], [2], [3], [7], [31], [35].

Большое количество исследований посвящено роли эпифиза и его гормонов в противоопухолевой резистентности организма [4], [8], [9], [10],

[11], [16], [27], [39]. Реализуется данное действие прежде всего через гормоны за счет влияния на клеточное деление, ингибцию некоторых обменных нарушений, лежащих в основе опухолевого роста.

Установлено, что применение мелатонина оказывает угнетающее влияние на развитие опухолей у животных [4], [16], [24], [29], [30]. Угнетение активности эпифиза избыточным освещением и эпифизэктомия оказывают стимулирующее воздействие на рост перевиваемых, индуцированных канцерогенами и спонтанных новообразований молочной железы; стимуляция функции эпифиза, введение экстрактов эпифиза или мелатонина обладают противоопухолевым эффектом [1], [2], [8], [30], [35], [36], [41], [42].

Антиопухолевые эффекты мелатонина могут включать его влияние на синтез и секрецию гипофизарных и половых гормонов, вовлеченных в рост опухолей, модуляцию им иммунного ответа на наличие опухолевых клеток, действие как эндогенного антиоксиданта и его прямые цитостатические эффекты [3], [5], [22], [31].

Воздействие света уменьшает ночную продукцию мелатонина, что приводит к увеличению уровня женских половых гормонов, стимулирующих пролиферацию ткани молочной железы и эндометрия [3], [37]. Постоянное освещение также увеличивает частоту развития железистого рака молочной железы и укорачивает латентный период их развития в условиях воздействия химических канцерогенов [2], [3], [25], [29], [32], [34], [36].

Вместе с тем эксперименты на животных продемонстрировали ингибирующее влияние на спонтанный и индуцированный канцерогенез световой депривации [2], [5], [8], [10], [42] или введения экзогенного мелатонина [2], [4], [16], [24], [29]. В эпидемиологических исследованиях установлено 36 % повышение риска рака молочной железы у женщин, работавших в ночную смену [37]. В то же время у слепых женщин, имевших высокий среднесуточный уровень мелатонина в крови, риск развития рака молочной железы в 2 раза ниже, чем у зрячих [1], [3], [21]. Это подтверждает профилактическое действие гормона в отношении развития злокачественных новообразований.

Под влиянием мелатонина снижается пролиферация этих клеток, увеличивается число клеток, умирающих в результате апоптоза, снижается метастазирование. Кроме того, он оказывает прямое воздействие на опухолевые клетки – увеличивает продолжительность клеточного цикла (за счет удлинения фаз G1, G2 и задержки начала S-стадии), что позволяет опухолевым клеткам достигнуть большей степени дифференцировки [31].

Рак матки. В ряде исследований показана обратная связь между нарушением синтеза мелатонина и развитием рака тела матки. Приво-

дятся данные о том, что содержание мелатонина в крови у онкобольных на 50 % ниже, чем у здоровых женщин [28].

Рак молочной железы. У женщин с ранними клиническими стадиями первичного рака молочной железы выявлено значительное снижение пика концентрации мелатонина. Кроме того, отмечено снижение суточной экскреции мелатонина (на 30 %) и экскреции гормона во второй половине дня и ночью (на 50 %) по сравнению с контрольной группой [28].

Рак предстательной железы. Мелатонин препятствует развитию гормонально-чувствительных аденокарцином простаты, угнетая гонадотропную функцию гипофиза и синтез тестостерона. Ночная секреция мелатонина значительно снижена у больных с низкодифференцированными опухолями железы [29].

Рак легкого. У больных с первичным раком легкого достоверно снижена ночная экскреция мелатонина по сравнению с обследованными лицами контрольной группы [29].

Рак желудка. В исследовании Т. В. Кветной и И. В. Князькина (2003) показано статистически достоверное снижение ночной экскреции мелатонина у мужчин с первичным раком желудка по сравнению с пациентами группы неопухолевого контроля аналогичного возраста [11].

Таким образом, результаты экспериментальных, эпидемиологических и клинических исследований свидетельствуют об участии эпифиза и мелатонина в предупреждении развития и прогрессирования злокачественных опухолей.

В опытах В. Н. Анисимова и соавторов мелатонин применялся у 50 самок мышей линии СВА с 6-месячного возраста до естественной гибели. У мышей, получавших мелатонин, достоверно уменьшалась интенсивность свободно-радиальных реакций в сыворотке крови, мозге и печени. После 22-месячного возраста наблюдалось заметное снижение смертности в опытной группе, вследствие чего кривая выживаемости смещалась вправо по сравнению с кривой выживаемости в контрольной группе [26].

У самок мышей линии SHR, у которых мелатонин использовался в течение 5 дней ежемесячно в дозе 20 мкг/мл (начиная с 3-месячного возраста), выявлено более постепенное угасание эстральной функции и увеличение средней продолжительности жизни (СПЖ) от 759 ± 8 до 845 ± 13 суток ($p < 0,05$). В дозе 2 мкг/мл мелатонин уменьшал общую частоту развития опухолей почти в 2 раза, а аденокарцином молочной железы – в 4,3 раза [1], [29].

У самок мышей сублиний SAMP-1 и SAMR-1, получавших мелатонин в ночное время, отмечено замедление старения репродуктивной системы, уменьшение константы скорости старения и увеличение времени удвоения смертности мышей [4], [37].

Таким образом, в большинстве исследований длительное введение мелатонина приводило к увеличению СПЖ. Геропротекторный эффект мелатонина чаще проявлялся у самцов (80 % всех опытов) по сравнению с самками (55 % опытов). Предполагают, что геропротекторное действие мелатонина объясняется его способностью уменьшать образование активных форм кислорода и оказывать стимулирующее влияние на активность антиоксидантных систем организма [19], [21].

Происхождение и роль нейропептидов эпифиза. В настоящее время имеются доказательства, что физиологические функции шишковидной железы связаны не только с мелатонином, но и с факторами пептидной природы [1], [5], [7], [11], [19]. В эпифизе обнаружены многие известные регуляторные пептиды, которые совместно с белковыми веществами шишковидной железы могут быть отнесены к трем группам [35].

1. Вещества, которые синтезируются вне эпифиза и попадают в железу по пептидергическим аксонам: аргининин-вазопрессин, аргининин-вазотионин, окситоцин, нейропептид Y, нейрокинин А, нейропептид К, субстанция Р. Их функцией является передача информации к пинеальной железе от других структур мозга.

2. Вещества, которые синтезируются экстрапинеально и захватываются пинеалоцитами из кровотока: лютеинизирующий и фолликулостимулирующий гормоны, пролактин, соматотропный гормон. Эти гормоны оказывают влияние на функцию эпифиза путем передачи информации о состоянии эндокринной системы.

3. Субстанции, которые синтезируются непосредственно в пинеалоцитах: пинеальный антигонадотропин, секронеурин и др.

Фармакопейный препарат эпیتالамин представляет собой комплекс водорастворимых пептидов, выделенных из эпیتالамно-эпифизарной области телят методом экстракции [1]. Препарат не содержит мелатонин и другие индолы.

Эпیتالамин обладает тропным действием в отношении подкорковых образований мозга, и его эффекты объясняются влиянием на синтез мелатонина путем его стимуляции [16]. Препарат улучшает функциональное состояние мозга, нормализует гомеостаз, тормозит рост опухолей. Представляется перспективным изучение применения препарата в невропатологии, психиатрии и гериатрии [5], [19].

Препарат эпیتالон разработан на основе анализа аминокислотного состава эпیتالамина

и представляет синтетический тетрапептид (Ala-Glu-Asp-Gly), который обладает более высокой биологической активностью, чем эпیتالамин [19], [20], [23].

Введение эпیتالона мышам линии СВА начиная с 6-месячного возраста подкожно по 0,1 мкг в изотоническом растворе NaCl приводило к достоверному увеличению продолжительности жизни: до 2-летнего возраста дожили в 4 раза больше животных, получавших эпیتالон, чем в контрольной группе ($p < 0,001$), была большей и СПЖ последних 10 % животных, а максимальная продолжительность жизни (МПЖ) увеличилась на 10 месяцев [16]. Эти данные свидетельствуют о существенном геропротекторном действии эпیتالона [5], [4], [9], [11], [38].

Под влиянием эпیتالона у животных наблюдалось снижение частоты развития всех опухолей и их множественности. В целом эпیتالон оказывал угнетающее влияние на спонтанный канцерогенез у мышей линии СВА [1], [16].

В опытах И. А. Виноградовой и соавторов (2007, 2008) эпیتالон вводили самцам и самкам крыс, содержащихся в условиях стандартного светового режима (12 ч. – свет, 12 ч. – темнота), естественного светового режима Северо-Запада России (г. Петрозаводск) или постоянного освещения. Было выявлено, что в условиях естественного и постоянного освещения у животных наблюдалось «ускоренное старение» и уменьшение СПЖ и МПЖ. У животных увеличивалась частота развития новообразований. Применение эпیتالона предупреждало развитие возрастной патологии, включая опухоли [9], [10].

Таким образом, имеющиеся данные свидетельствуют о том, что эпифиз играет важную роль в механизмах гомеостаза и старения. Угнетение функции эпифиза приводит к нарушению многих физиологических функций организма, развитию ряда ассоциированных с возрастом патологических процессов, включая злокачественные новообразования, и в конечном счете – к уменьшению продолжительности жизни [1], [8], [16], [26], [35].

Представляется перспективным дальнейшее изучение гормонов и нейропептидов эпифиза с целью практического внедрения для профилактики риска развития различных видов онкопатологии, возрастной патологии и увеличения периода активного долголетия человека.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Анисимов В. Н. Молекулярные и физиологические механизмы старения: В 2 т. 2-е изд., перераб. и доп. СПб.: Наука, 2008. Т. 1. 481 с.
2. Анисимов В. Н., Виноградова И. А. Световой режим, мелатонин и риск рака // Вопросы онкологии. 2006. Т. 52. № 5. С. 491–498.
3. Анисимов В. Н., Виноградова И. А. Старение женской репродуктивной системы и мелатонин. СПб.: Система, 2008. 46 с.
4. Анисимов В. Н., Попович И. Г., Забежинский М. А. и др. Влияние эпیتالона и мелатонина на продолжительность жизни и спонтанный канцерогенез у мышей с ускоренным старением (SAM) // Вопросы онкологии. 2005. Т. 51. № 1. С. 93–98.

5. Анисимов В. Н., Хавинсон В. Х., Заварзина Н. Ю. и др. Влияние пептида эпифиза на показатели биологического возраста и продолжительность жизни мышей // Российский физиологический журнал. им. И. М. Сеченова. 2001. Т. 87. № 1. С. 125–135.
6. Арушунян Э. Б. Гормон эпифиза мелатонин – новое ноотропное средство? // Экспериментальная и клиническая фармакология. 2005. Т. 68. № 3. С. 74–79.
7. Виноградова И. А. Влияние светового режима на развитие метаболического синдрома у крыс в процессе старения // Успехи геронтологии. 2007. Т. 20. № 2. С. 70–75.
8. Виноградова И. А., Букалёв А. В., Забежинский М. А. и др. Влияние пептида Ala-Glu-Asp-Glu на продолжительность жизни и развитие спонтанных опухолей у самок крыс при различных световых режимах // Бюллетень экспериментальной биологической медицины. 2007. Т. 144. № 12. С. 676–681.
9. Виноградова И. А., Букалёв А. В., Забежинский М. А. и др. Влияние светового режима и мелатонина на гомеостаз, продолжительность жизни и развитие спонтанных опухолей у самцов крыс // Вопросы онкологии. 2008. Т. 54. № 1. С. 70–77.
10. Виноградова И. А., Букалёв А. В., Забежинский М. А. и др. Геропротекторный эффект пептида Ala-Glu-Asp-Glu у самцов крыс, содержащихся при разных режимах освещения // Бюллетень экспериментальной биологии и медицины. 2008. Т. 145. № 4. С. 455–460.
11. Кветная Т. В., Князькин И. В. Мелатонин: роль и значение в возрастной патологии. СПб.: ВМедА, 2003. 93 с.
12. Коркушко О. В., Хавинсон В. Х., Шатило В. Б. Пинеальная железа: пути коррекции при старении. СПб.: Наука, 2006. 204 с.
13. Ноздрачев А. Д., Поляков Е. Л. Анатомия крысы. СПб.: Лань, 2001. 464 с.
14. Пальцев М. А., Кветной И. М. Руководство по нейроиммуноэндокринологии. М.: Медицина, 2006.
15. Попович И. Г. Влияние препаратов, обладающих геропротекторными свойствами, на спонтанный канцерогенез у мышей // Успехи геронтологии. 2004. Вып. 14. С. 105–113.
16. Романенко В. И. Мелатонин как возможный эндогенный лейкозогенный (бластогенный) агент // Гематология и трансфузиология. 1983. № 3. С. 47–50.
17. Ром-Богуславская Е. С. Эпифиз (пинеальная железа) в норме и патологии // Советская медицина. 1981. № 8. С. 68–73.
18. Хавинсон В. Х., Анисимов В. Н. Пептидные регуляторы и старение. СПб.: Наука, 2003. 223 с.
19. Хавинсон В. Х., Кветной И. М., Южаков В. В. и др. Пептидергическая регуляция гомеостаза. СПб.: Наука, 2003. 194 с.
20. Хелимский А. М. Эпифиз (шишковидная железа). М.: Медицина, 1969. 187 с.
21. Anisimov V. N. The solar clock of aging // Acta gerontol. 1995. Vol. 45. P. 137–150.
22. Anisimov V. N. The role of pineal gland in breast cancer development // Crit. Rev. Oncol. Hematol. 2003. Vol. 46. P. 221–234.
23. Anisimov V. N., Baturin D. A., Popovich I. G. et al. Effect of exposure to light-at-night on life span and spontaneous carcinogenesis in female CBA mice // Int. J. Cancer. 2004. Vol. 111. P. 475–479.
24. Anisimov V. N., Hansen J. Light, endocrine systems and cancer – a meeting report // Neuroendocrinol. Lett. 2002. Vol. 23, suppl. 2. P. 78–81.
25. Anisimov V. N., Khavinson V. Kh., Popovich I. G. et al. Effect of Epitalon o biomarker of aging, life span and spontaneous tumor incidence in female Swiss-derived SYR mice // Biogerontol. 2003. Vol. 4. P. 193–202.
26. Anisimov V. N., Khavinson V. Kh., Provinciali N. et al. Inhibitory effect of the peptide epitalon on the development of spontaneous mammary tumors in HER-2 neu transgenic mice // Int. J. Cancer. 2002. Vol. 101. P. 7–10.
27. Arendt J. Melatonin: characteristics, concern and prospect // J. Biol. Rhythms. 2005. Vol. 20. P. 291–303.
28. Bartsch C., Bartsch H. The anti-tumor activity of pineal melatonin and cancer enhancing life styles in industrialized societies // Cancer causes control. 2006. Vol. 17. P. 559–571.
29. Bartsch C., Bartsch H., Karasek M. Melatonin in clinical oncology // Neuroendocrinol. Lett. 2002. Vol. 23, suppl. 1. P. 30–38.
30. Bobby T., Mohanakumar K. P. Melatonin protects against oxidative stress caused by 1-methyl-4-phenyl-1,2,3,6-tetrahydropyridine in the mouse nigrostriatum // Journal of Pineal Res. 2004. Vol. 36. № 1. P. 25–32.
31. Bullough J. D., Rea M. S., Figueiro M. G. Of mice and women: Light as a circadian stimulus in breast cancer research // Cancer Causes Control. 2006. Vol. 17. P. 375–383.
32. Call C., Weaver D. R., Moek J., Jilg A., Stehle J. H., Korf H.-V. Melatonin Plays a Crucial Role in the Regulation of Rhythmic Clock Gene Expression in the Mouse Pars Tuberalis // Ann. N. Y. Acad. Sci. 2005. Vol. 1040. P. 508–511.
33. Claustrat B., Brun J., Chazot G. The basic physiology and pathophysiology of melatonin // Sl. Med. Reviews. 2005. Vol. 9. P. 11–24.
34. Di Bello L., Gualano L. Key aspects of melatonin physiology: Thirty years of research // Neuroendocrinol. Lett. 2006. Vol. 27. № 4. P. 425–432.
35. Foreman J. Melatonin, sleep aid that may fight cancer // International Herald Tribune. 2005. October 6. P. 15.
36. Khavinson V. Kh. Peptides and ageing // Neuroendocrinol. Lett. 2002. Vol. 23, suppl. 3. Special Issue.
37. Korf H.-W., Von Gall C., Stehle J. The Circadian System and Melatonin: Lessons from Rats and Mice // Chronobiology International. 2003. Vol. 20. № 4. P. 697–710.
38. Lerner A., Case J., Takahashi J. Isolation of melatonin, the pineal gland factor that lightens melanocytes // J. Amer. Chem. Soc. 1958. Vol. 81. P. 6084–6086.
39. Mills E., Wu P., Seely D., Guyatt G. Melatonin in the treatment of cancer: a systematic review of randomized controlled trials and meta-analysis // J. Pineal Res. 2005. Vol. 39. № 4. P. 360–366.
40. Okatani Y., Wakatsuki A., Reiter R. J., Miyhara Y. Melatonin reduces oxidative damage of neural lipids and proteins in senescence-accelerated mouse // Neurobiol. Aging. 2002. Vol. 23. № 4. P. 639–644.
41. Vinogradova I. A., Anisimov V. N., Bukalev A. V., Ilyukha V. A., Khizhkin E. A., Lotosh T. A., Semenchenko A. V., Zabezhinski M. A. Circadian disruption induced by light-at-night accelerates aging and promotes tumorigenesis in young but not in old rats // Aging. 2010. Vol. 2. № 2. P. 82–92.
42. Vinogradova I. A., Anisimov V. N., Bukalev A. V., Semenchenko A. V., Zabezhinski M. A. Circadian disruption induced by light-at-night accelerates aging and promotes tumorigenesis in rats // Aging. 2009. Vol. 1. № 10. P. 855–865.

ГРИГОРИЙ ПЕТРОВИЧ ДАНИЛОВ

торакальный хирург, Республиканская больница им. В. А. Баранова (г. Петрозаводск)
danilovgp@list.ru

РАИСА ПЕТРОВНА МАКЕЕВА

кандидат медицинских наук, торакальный хирург, Республиканская больница им. В. А. Баранова (г. Петрозаводск)
raisa.makeeva@list.ru

ВЛАДИМИР АНДРЕЕВИЧ ШОРНИКОВ

кандидат медицинских наук, заведующий хирургическим отделением, Республиканская больница им. В. А. Баранова (г. Петрозаводск)
shornikov.vladimir@rambler.ru

ЭЛЬМИРА КУРБАНКАДИЕВНА ЗИЛЬБЕР

доктор медицинских наук, профессор кафедры критической и респираторной медицины медицинского факультета, Петрозаводский государственный университет
elmirazilber@psu.karelia.ru

АНДРЕЙ ЛЕОНИДОВИЧ АКОПОВ

доктор медицинских наук, профессор, заведующий отделом хирургической пульмонологии НИИ пульмонологии, Санкт-Петербургский государственный медицинский университет им. ак. И. П. Павлова
akopovand@mail.ru

КЛИНИКО-ФУНКЦИОНАЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ХИРУРГИЧЕСКОГО ЛЕЧЕНИЯ БРОНХОЭКТАЗИЙ У ПАЦИЕНТОВ ЗРЕЛОГО ВОЗРАСТА

Представлен опыт хирургического лечения 38 больных бронхоэктазами в возрасте от 45 до 60 лет. Прослежены ближайшие и отдаленные результаты проведенных операций. Показано, что хирургическое лечение должно рассматриваться в качестве важного компонента комплексного лечения клинически значимых локализованных бронхоэктазий у больных зрелого возраста, а возраст старше 45 лет не является абсолютным противопоказанием к хирургическому лечению клинически значимых локализованных бронхоэктазий.

Ключевые слова: бронхоэктазы, резекция легкого, функция внешнего дыхания

ВВЕДЕНИЕ

На сегодняшний день лечение бронхоэктазий в зрелом возрасте остается важной проблемой торакальной хирургии и пульмонологии [9], [18], [19]. По мнению М. Ashour и соавторов, наибольшее число больных бронхоэктазиями наблюдается в возрасте от 11 до 30 лет [10]. Сходные данные можно встретить в работах Ф. Г. Углова, Н. В. Путова, М. И. Перельмана, В. Л. Толузакова, М. Srmala, G. Hacıibrahimoglu, T. Lasserson, R. Wilson. Показания и противопоказания к тем или иным видам лечения у детей и взрослых в молодом возрасте разработаны и внедрены в широкую практику [15], [17], [23], [25]. Лишь немногие публикации в современной литературе позволяют оценить частоту встречаемости и результаты лечения бронхоэктазий в зрелом возрасте [2], [7], [14]. На наш взгляд, в имеющихся работах недостаточно освещены вопросы отдаленных клинических и функциональных результатов, а именно они должны предопределять тактику. Целью настоящего исследования явилась оценка клинко-функциональных результатов хирургического лечения бронхоэктазий у пациентов зрелого возраста.

МАТЕРИАЛ И МЕТОДЫ

Материалом исследования послужил ретроспективный анализ клинического наблюдения за 38 пациентами в возрасте от 45 до 60 лет, оперированных в ГУЗ «Республиканская больница им. В. А. Баранова» г. Петрозаводска с 1996 по 2010 год по поводу локальных клинически значимых бронхоэктазий. Прослежены непосредственные и отдаленные результаты проведенного лечения.

Пациентам проведены клинические исследования, рентгенография, мультиспиральная компьютерная томография (МСКТ) грудной клетки (Light Speed VCT), исследование функций внешнего дыхания (функционально-диагностический комплекс «MasterLab» фирмы «Jaeger»), фибробронхоскопия, по показаниям выполнялись ангиография и бронхография.

Показаниями к хирургическому лечению являлись: частые (не менее трех раз в год) обострения заболевания при неэффективности консервативных мероприятий – 27 пациентов (71,05 %), рецидивирующее легочное кровотечение – 9 пациентов (23,68 %). Операции выполнялись в плановом порядке. В послеоперационном периоде проводилась антибиотикопрофилактика, респи-

раторная терапия. Особое внимание уделялось лечебной физкультуре, ранней активизации пациентов. Критериями исключения из исследования считали двусторонний характер поражения, вторичный характер бронхоэктазий при генетически обусловленной патологии (муковисцидоз, синдром Зиверта – Картагенера, Вильяма – Кэмбела и т. д.), наличие бронхиальной астмы, выраженных обструктивных нарушений, системных заболеваний соединительной ткани и другой тяжелой сопутствующей патологии.

Через год после операции обследованы 30 пациентов (78,94 %), через три года – 27 пациентов (71,05 %), через пять лет после операции – 20 пациентов (52,63 %).

РЕЗУЛЬТАТЫ

Средний возраст больных составил 52,22 года, из них в возрасте старше 55 лет – 5 больных (13,15 %). Женщин было 18 (47,37 %), мужчин – 20 (52,63 %). Клинические проявления составили в среднем 17,9 года. У 4 (10,52 %) пациентов проявления патологического процесса в легких имели сроки до 5 лет.

Основные симптомы были типичны для бронхоэктазий у пациентов обеих групп (табл. 1). 19 пациентов имели никотиновую зависимость, стаж курения составлял 23 ± 4 года, индекс курильщика (пачка-лет) – $17,9 \pm 4$ (табл. 1).

В 24 (63,15 %) случаях установлена связь начала заболевания с перенесенной пневмонией. Детские инфекции органов дыхания предшествовали появлению первых признаков бронхоэктазий у 6 (15,79 %) пациентов. Четверо из 6 пациентов, имевших клинически значимую гастроэзофагеальнорефлюксную болезнь (ГЭРБ) 2-й ст., смогли сопоставить клинические проявления, что позволило нам предположить ее влияние на развитие легочной патологии. У 4 (10,53 %) пациентов связи с ранее перенесенными заболеваниями не установлено.

Таблица 1

Клинические симптомы

Симптом		Абс.	%
Кашель		33	86,84
Гнойная мокрота		26	68,42
Интоксикация		6	15,78
Легочное кровотечение	1-я ст.	7	18,42
	2-я ст.	2	5,26
Абсцедирование		1	2,63
Одышка по шкале MRS		0,51 ± 0,4	
Обострения заболевания не менее 4 раз в год		32	84,21

Исследование мокроты проводилось в различные сроки, как амбулаторно, так и в условиях стационара. По полученным результатам отмечалось содержание большого количества нейтрофилов, эластических волокон, в некоторых случаях – эритроцитов. Информативность бактериологических исследований была невысокой и составила 34,21 % (13 пациентов).

По результатам лучевых методов исследований определены форма и локализация бронхоэктазий (рис. 1). У 33 пациентов (86,84 %) наличие бронхоэктазий сопровождалось уменьшением объема пораженных участков легких.

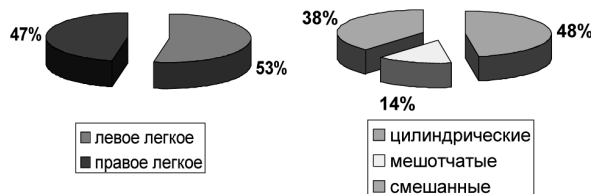


Рис. 1. Локализация и формы бронхоэктазий

Диагностическая фибробронхоскопия выполнена всем пациентам. Оценка изменений слизистой проводилась с учетом классификации В. А. Герасина (1981) (табл. 2). Исходные показатели функции внешнего дыхания в среднем находились в пределах нормы. Выраженных обструктивных нарушений в исследуемой группе пациентов не было. Значимые сопутствующие заболевания и их сочетания встречены в 18 (47,37 %) случаях (табл. 3).

Таблица 2

Эндоскопические изменения

Характер эндобронхита	Гнойный эндобронхит		Катаральный эндобронхит	
	абс.	%	абс.	%
Диффузный эндобронхит			10	26,31
Локальный эндобронхит	5	15	20	52,63

Таблица 3

Сопутствующая патология

Патология	Группа 1
ГЭРБ	6
Язвенная болезнь вне обострения	3
Ишемическая болезнь сердца	3
Гипертоническая болезнь	5
Сахарный диабет 2-го типа	1

Приведенные данные показывают, что полиморбизм является значимой особенностью исследованной возрастной категории больных.

Операции (табл. 4) выполнялись в плановом порядке. Объем операции определяли, руководствуясь границами анатомических изменений. Предоперационная подготовка включала в себя муколитическую терапию, в том числе и с ингаляционным введением лекарственных средств. По показаниям назначалась антибактериальная бронхолитическая терапия, выполнялись бронхоскопические санации. Сопутствующая патология корректировалась специалистами на догоспитальном этапе и в стационаре. Выполнялись только односторонние анатомические резекции легких. В послеоперационном периоде проводились антибиотикопрофилактика и респираторная терапия. Особое внимание уделялось ранней активизации пациентов.

Таблица 4
Характеристика оперативных вмешательств

Тип операции	Сторона операции		Всего
	правое легкое	левое легкое	
Резекция С 4–5	13	2	15
Нижняя лобэктомия	3	9	12
Верхняя лобэктомия	1		1
Резекция С 3	1		1
Резекция С 5–10 слева	–	3	3
Резекция С 4–10 слева	–	4	4
Резекция С 4–5 и базальной пирамиды	–	2	2
Итого	18	20	38

В послеоперационном периоде у 8 (21,05 %) пациентов развилось 16 осложнений. Внутриплевральное кровотечение в раннем послеоперационном периоде выявлено и своевременно устранено в двух случаях (реторакотомия). Четверо пациентов нуждались в повторных плевральных пункциях в связи с развившимся после удаления дренажа экссудативным плевритом. Временные, до 5–7 дней, дисковидные ателектазы различной локализации, в том числе и на контралатеральной стороне, отмечены у 4 пациентов. Необратимых ателектазов не было. У 2 больных после резекции С 4–10 слева, несмотря на принятые меры профилактики (лечебный пневмоперитонеум), видимо, ввиду несоответствия объема оставшихся сегментов и плевральной полости, при наличии бронхоплеврального свища сформировались небольшие сухие остаточные полости, самостоятельно зажившие через 2 и через 6 месяцев соответственно. Нагноение послеоперационной раны имело место в одном наблюдении и было купировано в течение недели. В 3 случаях отмечено замедленное расправление легкого, не повлиявшее на сроки послеоперационного периода и благополучно разрешившееся к 10–12-му дню после операции. Летальных исходов не было.

Проанализирована зависимость осложнений от объема операции (табл. 5). Эти данные позволили прийти к выводу о зависимости осложнений от объема резекций, что, вероятнее всего, связано с ригидностью легочной паренхимы у людей старшего возраста.

Таблица 5
Зависимость осложнений от объема операции

Объем операции	Количество осложнений
Резекция менее 3 сегментов	2
Резекция от 3 до 5 сегментов	3
Резекция более 5 сегментов	6

Результаты лечения оценивались на основании клинико-anamnestических данных и данных проведенного обследования. Объективными критериями служили данные рентгенографии (фас, левый, правый бок), МСКТ с 3d-реконс-

трукцией, показатели комплексного исследования функций внешнего дыхания (жизненная емкость легких (ЖЕЛ), объем форсированного выдоха за первую секунду (ОФВ1), индекс Тиффно, общая емкость легких (ОЕЛ), остаточный объем легких (ООЛ)), рецидивы и осложнения течения основной патологии.

Через год исследовано 30 (78,94 %) пациентов, через 3 года – 27 (71,05 %), через 5 лет – 20 (52,63 %) пациентов.

Пациенты на протяжении всего срока наблюдения в подавляющем большинстве положительно оценили клинический эффект (рис. 2). Ими отмечен регресс имевших место до операции признаков очага хронической инфекции, снижение частоты обострений хронического бронхита. В то же время после трех лет наблюдения у части пациентов отмечен некоторый рост клинических и функциональных нарушений (рис. 3).

Влияние объема резекций на функциональные показатели внешнего дыхания не вызвало сомнений, но лишь проведенный анализ позволил выявить характер предполагаемых изменений. Наибольшие изменения отмечены в группе с резекцией более 5 сегментов. К 3-му году наблюдений отмечено развитие викарной эмфиземы с нарастанием остаточного объема при незначительном снижении жизненной емкости легких. Через 5 лет отмечено продолжение изменений ООЛ с развитием у отдельных пациентов симптома газовой ловушки (рис. 3).

Поздние осложнения за первый год наблюдений отмечены в 2 случаях. В одном имело место рецидивирующее кровохарканье, связанное с явлениями культи, на фоне выхода 2 аппаратных скобок в просвет культи. При очередной ФБС скобки были извлечены, явления культи купированы. Один пациент на протяжении 3 лет дважды госпитализировался с клиникой ограниченной эмпиемы плевры, в отделении проводились пункции полости гнойника под контролем УЗИ, курсы активной антибактериальной терапии с учетом возбудителя (*Staphylococcus aureus*), респираторная терапия. Данное осложнение развилось после нижней лобэктомии справа, причем в раннем послеоперационном периоде осложнений, повлиявших на сроки госпитализации и характер течения послеоперационного периода, не отмечалось. Наиболее вероятной причиной осложнения служила микронесостоятельность культи нижнедолевого бронха.

Из 8 пациентов первой клинической группы, у которых в раннем послеоперационном периоде были отмечены осложнения, в установленные сроки нами осмотрены 5 человек. У одного из пациентов (перенесшего реторакотомию по поводу кровотечения, в дальнейшем наблюдался экссудативный плеврит (4-е сутки после операции) и нагноение послеоперационной раны (8-е сутки после операции)) в последующем отмечалось снижение основных показателей функций

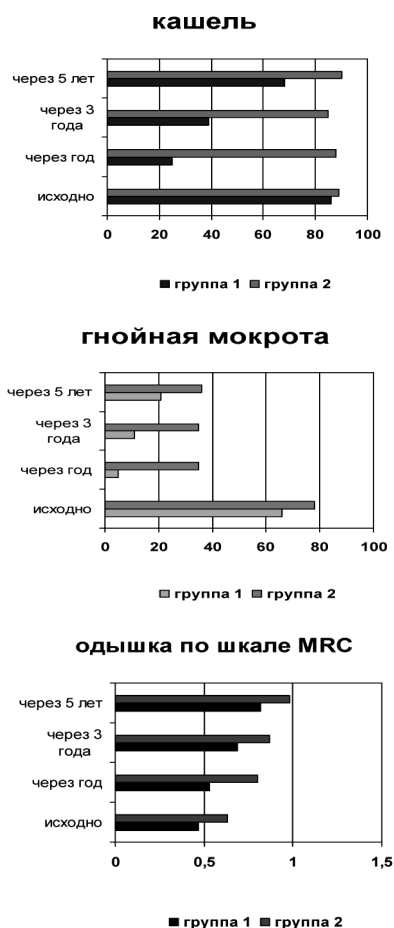


Рис. 2. Динамика клинических данных за период наблюдения

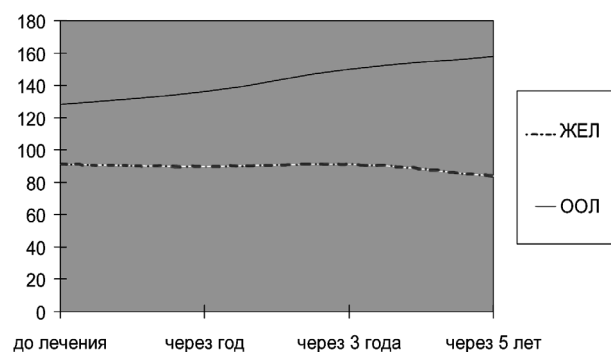


Рис. 3. Особенности динамики результатов функциональных исследований

внешнего дыхания по сравнению с исходными за счет уменьшения ЖЕЛ с 4,02–116,14 % до 3,18–91,10 % и ОФВ за 1 сек. с 3,98–101,43 % до 3,01–89,64 %. При этом, по клиническим данным, течение его патологии из выраженной перешло в легкую стадию. У второго пациента, несмотря на реторакотомию, также выполненную по поводу кровотечения, послеоперационный период протекал гладко, колебания показателей функций внешнего дыхания не превысили 5 %.

Наиболее значительными оказались изменения результатов спирометрии у двух пациентов,

течение послеоперационного периода у которых осложнилось развитием остаточной сухой полости. Однако нельзя однозначно утверждать, что в большей степени повлияло на результат – объем операции (у обоих резекция С 4–10 слева) или перенесенное осложнение. Тем не менее у одного из них результат признан неудовлетворительным. К 5-му году наблюдения, по соответствующим клиническим (частота обострений и характер течения хронического бронхита) и функциональным данным (нарастание смешанных нарушений в сочетании с увеличением остаточного объема (симптом газовой ловушки)), пациент из выраженной клинической стадии перешел в тяжелую. Существенного влияния перенесенных ранних послеоперационных осложнений на отдаленные результаты у других пациентов не встречено.

За весь период наблюдения повторные операции никому из больных не производились. Сведений о летальных исходах среди больных, вошедших в исследование, за весь период наблюдения не получено.

ОБСУЖДЕНИЕ

Наличие очага хронической инфекции, коим являются бронхоэктазии, особенности клинических проявлений заболевания (кашель с мокротой, хроническая интоксикация и т. д.) и тяжесть возможных осложнений (легочные кровотечения, абсцедирования, деструктивные пневмонии и эмпиемы плевры, развитие амилоидоза и легочного сердца) существенно влияют на трудоспособность, ухудшают качество жизни пациентов [1], [3], [4], [5], [7], [13], [20], [21], [22], [24].

Немногие публикации в современной литературе позволяют оценить результаты лечения бронхоэктазий в зрелом возрасте [2], [8], [14]. Мнимая бесперспективность хирургического лечения и нередко относительно неплохие результаты консервативной терапии уводят авторов от исследования данной категории пациентов [6]. Увеличение продолжительности жизни людей за последние десятилетия существенно (за последние сто лет почти вдвое) обеспечило основной прирост населения за счет лиц зрелого и пожилого возраста. Современный уровень развития диагностических и лечебных методик, новые возможности анестезиологии, реаниматологии, реабилитации требуют от врачей изменения, а ряде случаев и пересмотра показаний к различным методам лечения.

В своей работе нам пришлось столкнуться с сомнениями в выборе оптимального объема резекции легочной ткани при сравнении данных радиоизотопной сцинтиграфии с данными спиральной компьютерной томографии. Выполнение двусторонней бронхографии позволило уточнить анатомические границы изменений. Данные особенности были характерны для пациентов с деформирующим бронхитом, локали-

зованным в смежных с пораженными сегментах легкого.

Авторы современных публикаций по исследованиям ФВД у пациентов с бронхоэктазиями, не осложненными ХОБЛ или другой сопутствующей патологией, обычно не находят серьезных отклонений от нормы и зависимости основных показателей от возраста [8], [12], [14]. Нами была проделана большая работа по исследованию функций внешнего дыхания в условиях Респираторного центра Республиканской больницы на функционально-диагностическом комплексе «MasterLab» фирмы «Jaeger» до начала исследования и в процессе лечения больных. У пациентов с резекцией менее 5 сегментов нарушений вентилиционной способности не было выявлено, у больных с объемными резекциями отмечено развитие викарной эмфиземы с нарастанием остаточного объема при незначительном сниже-

нии жизненной емкости легких с развитием у отдельных пациентов симптома газовой ловушки.

Некоторые зарубежные авторы используют гемодинамическую классификацию как основу функциональных и морфологических критериев диагностики [10], [11], [16]. При наличии современных спирометрических комплексов и возможности радиоизотопного исследования перфузии мы считаем необходимость ангиопульмонографии сомнительной.

Проведенное исследование показало возможность и эффективность применения хирургических методов лечения клинически значимых локальных форм бронхоэктазий у пациентов зрелого возраста как составного компонента комплексного лечения патологии. Важно отметить, что лучшие результаты хирургического лечения достигаются у пациентов с коротким анамнезом и объемом поражения менее 5 сегментов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Воронов А. А., Александров О. В., Калеченков М. К., Шаров Ю. К. Ближайшие и отдаленные результаты резекции легких при бронхоэктазиях // Вестник хирургии им. И. И. Грекова. 1986. Т. 137. № 12. С. 3–6.
2. Кокосов А. Н. Пневмология в пожилом и старческом возрасте. СПб., 2005. 712 с.
3. Королев Б. А., Широкова А. П., Чернова Р. И., Горохова З. А. Сегментарные резекции легких при бронхоэктатической болезни // Вестник хирургии им. И. И. Грекова. 1982. Т. 128. № 1. С. 30–35.
4. Медвенский Б. В. Клинико-функциональные результаты резекций легких при бронхоэктазиях у взрослых: Дисс. ... канд. мед. наук. СПб., 1981.
5. Медвенский Б. В. Отдаленные результаты резекции легких при бронхоэктазиях у взрослых // Грудная хирургия. 1984. № 6. С. 50–54.
6. Синопальников А. И., Шойхет Я. Н. Бронхоэктазы: взгляд на проблему терапевта и хирурга // Терапевтический архив. 2009. № 3. С. 75–82.
7. Чучалин А. Г. Бронхоэктазы: клинические проявления и диагностические программы // Русский медицинский журнал. 2005. Т. 13. № 4. С. 177–182.
8. Яблонский П. К., Петрунькин А. М., Николаев Г. В., Мосин И. В. Изменение функциональной способности легких после лобэктомии у больных с сопутствующей хронической обструктивной болезнью легких // Вестник хирургии им. И. И. Грекова. 2009. Т. 168. № 3. С. 26–30.
9. Agasthian T., Deshchamps C., Trastek V. F. et al. Surgical management of bronchiectasis // Ann. Thorac. Surg. 1996. Vol. 62. P. 976–981.
10. Ashour M. Hemodynamic alterations in bronchiectasis: A base for a new subclassification of the disease // The Journal of Thoracic and Cardiovascular Surgery. 1996. Vol. 112. № 2. P. 328–335.
11. Ashour M., Al-Kattan K., Rafay M. A., Saja K. F., Hajjar W., Al-Fraye A. R. Current surgical therapy for bronchiectasis // World J. Surg. 1999. Vol. 23. P. 1096–1104.
12. Carter R., Nicotra B. Differing effects of airway obstruction on physical work capacity and ventilation in men and women with COPD // Chest. 1994. Vol. 106. P. 1730–1739.
13. Deslaunies J., Goulet S., François B. Surgical treatment of bronchiectasis and broncholithiasis // Advanced therapy in thoracic surgery / Eds. L. F. Franco, J. B. Putnam // Hamilton, ON: Decker, 1998. P. 300–309.
14. Giovannetti R., Alifano M., Stefani A. et al. Surgical treatment of bronchiectasis: early and long-term results // Interactive Cardiovasc. Thorac. Surg. 2008. Vol. 7. P. 609–612.
15. Gokhan H., Mithat F., Aysun O., Atilla G., Mehmet A. B. Surgical management of childhood bronchiectasis due to infectious disease // J. Thorac. Cardiovasc. Surg. 2004. Vol. 127. P. 1361–1365.
16. Khaled M., Mohamed A., Waseem M., Mahmoud H. et al. Surgical results for bronchiectasis based on hemodynamic (functional and morphologic) classification // J. Thorac. Cardiovasc. Surg. 2005. Vol. 130. P. 1385–1390.
17. Lasserson T., Holt K., Evans D., Greenstone M. Anticholinergic therapy for bronchiectasis // Cochrane Database Syst. Rev. 2001. Vol. 4.
18. Manucher A., Ali S., Hosin A., Ali A. Surgical Management of Bilateral Bronchiectases. Results in 29 Patients // Asian. Cardiovasc. Thorac. Ann. 2006. Vol. 14. P. 219–222.
19. Mazières J., Murris M., Didier A., Giron J., Dahan M., Berjaud J., Léophonte P. Limited operation for severe multiseptal bilateral bronchiectasis // The Annals of Thoracic Surgery. 2003. Vol. 75. P. 382–387.
20. Nicotra M. B., Rivera M., Dale A. M. et al. Clinical, pathophysiologic, and microbiologic characterization of bronchiectasis in aging cohort // Chest. 1995. Vol. 108. P. 955–961.
21. Onen Z. P., Gulbay B. E., Sen E., Yildiz O. A., Saryal S., Acican T. et al. Analysis of the factors related to mortality in patients with bronchiectasis // Respir Med. 2007. Vol. 101. P. 1390–1397.
22. Patel I. S., Vlahos I., Wilkinson T. M. et al. Bronchiectasis, exacerbation indices, and inflammation in chronic obstructive pulmonary disease // Am. J. Respir. Care Med. 2004. Vol. 170. P. 400–413.
23. Srmala M., Karasub S., Türüt H., Gezerd S., Kayad S. Surgical management of bronchiectasis in childhood // Eur. J. Cardiothorac. Surg. 2007. Vol. 31. P. 120–123.
24. Stephen T., Thankachen R., Madhu A. P., Neelakantan N., Shukla V., Korula R. J. Surgical results in bronchiectasis: Analysis of 149 patients // Asian Cardiovasc. Thorac. Ann. 2007. Vol. 15. P. 290–296.
25. Wilson R. Bronchiectasis // Respiratory infections. Philadelphia: Lippincott Williams and Wilkins, 2001. P. 347–359.

ВЯЧЕСЛАВ ВАСИЛЬЕВИЧ КЛЮЧЕВСКИЙ

доктор медицинских наук, профессор, заведующий кафедрой травматологии, ортопедии и военно-полевой хирургии лечебного факультета, Ярославская государственная медицинская академия

vvasp@mail.ru

ВАСИЛИЙ ПЕТРОВИЧ ВВЕДЕНСКИЙ

кандидат медицинских наук, заведующий эндоскопическим отделением ГБУЗЯО поликлиники № 2 (г. Ярославль)

vvasp@mail.ru

ЭФФЕКТИВНОСТЬ КОМБИНИРОВАННОЙ БРОНХОСКОПИИ ПРИ КОРРЕКЦИИ БРОНХООБСТРУКЦИИ У ПОСТРАДАВШИХ С ТЯЖЕЛЫМИ СОЧЕТАННЫМИ ТРАВМАМИ

Получены достоверные изменения клинической, рентгенологической и эндоскопической картины, а также показателей кислородного статуса, свидетельствующих об эффективности использования фибробронхоскопии с высокочастотной искусственной вентиляцией легких в режиме экспульсии для коррекции бронхообструкции аспирационного генеза при тяжелой сочетанной травме ($n = 419$).

Ключевые слова: бронхообструкция аспирационного генеза, высокочастотная вентиляция легких, фибробронхоскопия

Нарушения бронхиальной проходимости аспирационного генеза у пострадавших от тяжелой сочетанной травмы ведут к утрате значительной части легочной паренхимы с высокой вероятностью развития пневмонии [2], [5], [6], [8]. Визуально контролируемый туалет с удалением содержимого осуществим лишь в пределах бронхов 2–3-й генераций [1], [4]. Сложности, возникающие во время трахеобронхиального лаважа, сопряжены не только с его влиянием на легочную архитектуру, но и с трудностями вентиляции. Это является причиной ограниченного применения эндоскопической санации в случае, если обструкция локализуется в дистальных отделах трахеобронхиального дерева (ТБД) [7]. Новые перспективы в этом направлении открывает использование фиброоптической высокочастотной вентиляции легких для восстановления проходимости пораженных отделов ТБД после аспирации жидкого субстрата [3].

Цель работы – определение эффективности визуально контролируемой высокочастотной вентиляции легких в режиме экспульсии при коррекции бронхообструкции аспирационного генеза у пострадавших с тяжелой сочетанной травмой.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Материалом для решения поставленной задачи послужили результаты обследования и лечения 419 пострадавших с тяжелой сочетанной травмой, осложненной аспирацией (332 мужчины, 87 женщин в возрасте от 16 до 72 лет). При поступлении тяжесть состояния пациентов по АРАСНЕ II составила $17,12 \pm 0,13$ балла, общая тяжесть травмы по ISS – $23,72 \pm 0,32$ балла. Во всех наблюдениях эндоскопически констатировано попадание жидкого субстрата в нижние дыхательные пути.

Лечебно-диагностические фибробронхоскопии (ФБС) с использованием эндоскопов BF-40 фирмы «Olympus» проводили после стабилизации показателей витальных функций с пре- и постоксигенацией на фоне респираторной поддержки и непрерывного неинвазивного мониторинга AD , $ЧСС$, $ЧДД$, SpO_2 . Отрицательную динамику этих показателей на 5–7 % и более считали клинически значимой для временного прекращения выполнения ФБС и коррекции состояния больного.

Санацию визуально контролируемых отделов ТБД проводили с использованием вакуум-аспиратора, подключенного к рабочему каналу фиброэндоскопа. Для удаления жидкого аспирата из бронхов 4–5-го порядка и более применяли визуально контролируемый трахеобронхиальный лаваж или ФБС с высокочастотной вентиляцией легких в режиме экспульсии. Для лаважа использовали физиологический раствор, подогретый до $30–32\text{ }^{\circ}\text{C}$ с целью профилактики вагусных спастических реакций. Санирующий раствор вводили под визуальным контролем, посегментарно, однократно не более 10 мл (до 80 мл общего объема) по катетерам PR-2В фирмы «Olympus». Лаваж проводили до «чистой воды» и «чистой стенки».

ФБС в комплексе с высокочастотной искусственной вентиляцией легких (ВЧ ИВЛ) применяли только после визуальной констатации проходимости бронхов 1–3-й генерации (во избежание эффекта «газовой ловушки»). ВЧ ИВЛ в режиме экспульсии ($f = 300$ ц/мин, $I : E = 2 : 1 - 3 : 1$, $P_{\text{раб.}} = 1,5$ атм., однократная экспозиция на каждый бронх – не более 1 мин.) проводили через биопсийный канал фиброэндоскопа, дистальный конец которого поочередно устанавливали в устьях заинтересованных

сегментарных бронхов. Вязкость поступающего из дистальных отделов ТБД аспирата диктовала необходимость локального введения до 2,0 мл теплого физиологического раствора. Визуально контролируемую высокочастотную вентиляцию легких продолжали до получения неокрашенного, прозрачного санирующего раствора. Для объективизации реакции слизистой бронхов на ВЧ ИВЛ выполняли хромобронхоскопию с нейтральным 0,25 % метиленовым синим.

Степень тяжести осложнений, возникших при проведении ФБС, оценивали согласно классификации W. Credle, J. Smidly, R. Elliot (1974).

В зависимости от особенностей эндоскопических вмешательств больные были разделены на две группы. В контрольной группе (n = 233) использовали фиброоптический трахеобронхиальный лаваж физиологическим раствором, в основной (n = 186) – ФБС с высокочастотной вентиляцией легких. Для определения эффективности проводимых лечебных бронхоскопий исследовали динамику клинических, лабораторных и рентгенологических симптомов респираторной дисфункции. Эти изменения оценивали с учетом проведения больным принудительной или вспомогательной вентиляции легких при неизменных параметрах респираторной поддержки.

Показатели кислородного статуса и кислотно-основного состояния изучали с помощью анализатора газов крови «288 Blood-Gas System» фирмы «Ciba-Corning». Комплексное рентгенологическое обследование проводили на аппаратах «Hofman Metroskop 50 S» и «Sytec SRi» фирмы «GE». Рентгеновская компьютерная томография легких выполнялась с целью детализации выявленных изменений на уровне макроструктур. При необходимости уточнения состояния интерстициальной ткани, контуров и толщины стенок бронхов дополнительно проводили компьютерную томографию в режиме высокого разрешения (High Resolution Lung).

Статистическая обработка результатов исследований выполнена на персональном компьютере с использованием пакета статистических прикладных программ «Microsoft Statistica 6.0». Описательная статистика представлена в виде средних величин и их ошибки ($M \pm m$), их сравнение проводили с расчетом t-критерия Стьюдента.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

В результате проведенных исследований установлено, что регресс цианоза, диспноэ и «нового» паттерна дыхания, изменений в аускультативной картине (уменьшение или исчезновение хрипов в легких, улучшение проведения дыхания) отмечались уже в течение первого часа от момента выполнения лечебной бронхоскопии. Динамика клинической картины после удале-

ния жидкого аспирационного субстрата свидетельствовала о преимуществе проведения ФБС с ВЧ ИВЛ перед фиброоптическим трахеобронхиальным лаважем физиологическим раствором (табл. 1).

После восстановления проходимости пораженных бронхов констатировано достоверное увеличение парциального напряжения кислорода в артериальной крови и насыщения гемоглобина артериальной крови кислородом (табл. 1). Это свидетельствует о большей эффективности использования визуально контролируемой высокочастотной вентиляции легких в режиме экспульсии по сравнению с лаважем ТБД при удалении жидкого аспирата. Во всех наблюдениях улучшению показателей кислородного статуса, свидетельствовавших о нивелировании гипоксии и респираторного алкалоза, предшествовали положительные изменения клинической симптоматики.

Таблица 1

Динамика клинко-лабораторных симптомов респираторной дисфункции после удаления жидкого аспирата

Симптомы	Частота встречаемости			
	Контрольная группа (n = 233)		Основная группа (n = 186)	
	до лечения	после лечения	до лечения	после лечения
Цианоз	188 (80,69 %)	86 ¹ (36,91 %)	150 (80,65 %)	57 ¹ (30,65 %)
Диспноэ	61 (26,18 %)	14 ¹ (6,01 %)	59 (31,72 %)	9 ¹ (4,84 %)
«Новый» паттерн дыхания	61 (26,18 %)	7 ¹ (3 %)	57 (31,15 %)	5 ¹ (2,69 %)
Аускультативно констатируемые экспираторные полифонические хрипы в легких	229 (98,28 %)	109 ¹ (46,78 %)	183 (98,39 %)	54 ^{1,2} (29,03 %)
Аускультативно определяемое ослабление или отсутствие дыхания над различными отделами легких	209 (89,70 %)	82 ¹ (35,19 %)	185 (99,46 %)	28 ^{1,2} (15,05 %)
PaO ₂ , мм. Hg	54,4 ± 0,6	63,8 ± 0,6 ¹	54,3 ± 0,6	70,9 ± 0,7 ^{1,2}
PaCO ₂ , мм. Hg	34,8 ± 0,3	35,5 ± 0,3	33,4 ± 0,4	35,2 ± 0,3 ¹
SaO ₂ , %	86,6 ± 0,4	90,9 ± 0,3 ¹	86,8 ± 0,5	94,6 ± 0,2 ^{1,2}
pH	7,45 ± 0,01	7,43 ± 0,01 ¹	7,45 ± 0,01	7,44 ± 0,01 ¹

Примечание. ¹ – достоверность изменений показателей в каждой группе (p < 0,05); ² – достоверность изменений аналогичных показателей в 1-й и 2-й группах (p < 0,05).

Положительная динамика рентгенологических симптомов поражения легких выявлялась не ранее 18–24 часов от момента восстановления проходимости пораженных бронхов в виде снижения интенсивности затемнения и уменьшения размеров полей инфильтрации, нивелирования признаков ателектазирования легочной ткани. Достоверность различий, свидетельствующих о преимуществах проведения ФБС с ВЧ ИВЛ, констатирована при улучшении пневматизации пораженных отделов легких (табл. 2). Во всех

наблюдениях положительной динамике рентгенологической картины предшествовали изменения в клиническом и кислородном статусе.

Таблица 2

Динамика рентгенологических симптомов респираторной дисфункции после удаления жидкого аспирата

Симптомы	Частота встречаемости			
	Контрольная группа (n = 233)		Основная группа (n = 186)	
	до лечения	после лечения	до лечения	после лечения
Очагово-инfiltrативные изменения в легких	56 (24,03 %)	41 (17,6 %)	63 (33,87 %)	47 (25,27 %)
Признаки ателектазирования легочной ткани	27 (11,58 %)	19 (8,15 %)	21 (11,29 %)	5 (2,69 %) ^{1,2}
Очагово-инfiltrативные изменения + признаки ателектазирования легких	26 (11,26 %)	19 (8,15 %)	28 (15,05 %)	12 (6,45 %) ¹

Примечание. ¹ – достоверность изменений показателей в каждой группе ($p < 0,05$); ² – достоверность изменений аналогичных показателей в 1-й и 2-й группах ($p < 0,05$).

При проведении эндоскопического мониторинга установлено, что в течение первых шести часов после полного восстановления проходимости визуально контролируемых отделов ТБД отмечалось поступление аспирата из мелких бронхов – у 65 (27,9 %) больных в контрольной группе и у 13 (6,99 %) – в основной ($p < 0,001$). Во всех случаях – с нарушениями бронхиальной проходимости. Реобструкция бронхов при ее ранней эндоскопической верификации и своевременной коррекции не сопровождалась прогрессированием клинических, лабораторных или рентгенологических признаков респираторной дисфункции.

Следовательно, частота выявления реобструкции свидетельствовала в пользу использования ФБС с ВЧ ИВЛ, а не фиброоптического трахеобронхиального лаважа для коррекции бронхообструкции. Высокая вероятность поступления аспирата из мелких бронхов диктова-

ла необходимость проведения эндоскопического мониторинга и после деблокации пораженных отделов ТБД.

При проведении лечебных ФБС имели место только осложнения легкой степени. При выполнении фиброоптического лаважа физиологическим раствором (233 бронхоскопии) усиление гипоксии констатировано в 69 (29,61 %) наблюдениях, при проведении визуально контролируемой высокочастотной искусственной вентиляции легких (186 ФБС) – в 4 (2,15 %) ($p < 0,001$). При трахеобронхиальном лаваже выраженность гипоксических нарушений определялась «утоплением» здоровых отделов ТБД, несмотря на дозированные инстилляции санитизирующего раствора. Использование ВЧ ИВЛ при бронхоскопии нивелировало отрицательный эффект от механической обструкции нижних дыхательных путей введенным в них эндоскопом.

Отрицательного влияния высокочастотной искусственной вентиляции легких на слизистую бронхов по данным динамической хромографии не выявлено.

ВЫВОДЫ

При выполнении эндоскопической деблокации пораженных отделов трахеобронхиального дерева констатирована достоверная положительная динамика клинических симптомов (уменьшение хрипов в легких и улучшение проведения дыхания), показателей кислородного статуса (увеличение парциального давления кислорода и насыщения им гемоглобина артериальной крови), в рентгенологической картине (улучшение пневматизации легочной ткани) и в частоте встречаемости бронхиальной реобструкции. Полученные данные свидетельствуют о преимуществе использования визуально контролируемой высокочастотной искусственной вентиляции легких в режиме экспульсии перед фиброоптическим трахеобронхиальным лаважем физиологическим раствором при восстановлении бронхиальной проходимости после аспирации жидкого субстрата.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гуманенко Е. К., Фахрутдинов А. М. Роль бронхофиброскопии в диагностике и лечении тяжелой механической травмы // Вестник хирургии. 2001. № 5. С. 94–101.
2. Домникова Н. П., Сидорова Л. Д., Непомнящих Г. И. Внутрибольничные пневмонии: Патоморфогенез, особенности клиники и терапии, критерии прогноза. М.: Изд-во РАМН, 2003. 287 с.
3. Зильбер А. П., Шурыгин И. А. Высокочастотная вентиляция легких. Петрозаводск: Изд-во ПГУ, 1993. 162 с.
4. Миронов А. В., Абакумов М. М., Картавенко В. И. и др. Экстренная бронхофиброскопия у больных с закрытой травмой груди // Грудная и сердечно-сосудистая хирургия. 2002. № 3. С. 63–65.
5. Fleming C. A., Balaguera H. U., Craven D. E. Risk factors for nosocomial pneumonia. Focus on prophylaxis // Med. Clin. North. Am. 2001. Vol. 85. № 6. P. 1545–1563.
6. Ioanas M., Ferrer M., Cavalcanti M. et al. Causes and predictors of nonresponse to treatment of intensive care unit-acquired pneumonia // Crit. Care Med. 2004. Vol. 32. № 4. P. 938–945.
7. Moore F. A. Treatment of aspiration in intensive care unit patient // J. Parenteral Enteral Nutr. 2002. Nov.-Dec. 26. S. 69–74.
8. Scolapio J. S. Methods for decreasing risk of aspiration pneumonia in critically ill patients // J. Parenter. Enteral. Nutr. 2002. Vol. 26 (Suppl. 6). P. 58S–61S.

СЕРГЕЙ СЕРГЕЕВИЧ НИКИТИН

кандидат медицинских наук, ассистент кафедры детской хирургии медицинского факультета, Петрозаводский государственный университет
ssnikitin@yandex.ru

ЛИЛИЯ РОМАНОВНА КАЗАК

заведующий клинико-диагностической лабораторией, Детская республиканская больница (г. Петрозаводск)
drb-glav@mail.ru

АННА НИКОЛАЕВНА ШИРЯЕВА

биолог, Детская республиканская больница (г. Петрозаводск)
drb-glav@mail.ru

ВАЛЕНТИНА ЮРЬЕВНА ДОЛГОВА

врач клинической лабораторной диагностики, Детская республиканская больница (г. Петрозаводск)
drb-glav@mail.ru

НИНА ГРИГОРЬЕВНА ШЕВЧЕНКО

врач клинической лабораторной диагностики, Детская республиканская больница (г. Петрозаводск)
drb-glav@mail.ru

СВЕТЛАНА АЛЕКСАНДРОВНА ЧУДЕЦКАЯ

врач клинической лабораторной диагностики, Детская республиканская больница (г. Петрозаводск)
drb-glav@mail.ru

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ЛАБОРАТОРНОГО МЕТОДА ОПРЕДЕЛЕНИЯ АДРЕНОРЕАКТИВНОСТИ ПРИ СОЧЕТАННЫХ НАРУШЕНИЯХ ФУНКЦИЙ ТАЗОВЫХ ОРГАНОВ У ДЕТЕЙ

У детей с сочетанными нарушениями функций тазовых органов (гиперактивный мочевой пузырь и запоры) исследование состояния вегетативной нервной системы представляет определенные трудности. Наряду с общепринятыми методиками внедрен разработанный Р. И. Стрюк и И. Г. Длусской лабораторный метод определения адренореактивности организма. У детей данная методика использована впервые. Предложены нормативные показатели и выявлен высокий уровень активности симпатической нервной системы у детей с сочетанными нарушениями функций тазовых органов.

Ключевые слова: дети, гиперактивный мочевой пузырь, запоры, сочетанные нарушения функций тазовых органов, адренореактивность

Нарушения акта мочеиспускания и функции толстой кишки в детском возрасте – довольно распространенная и не всегда быстро поддающаяся лечению проблема. В возрастной группе 4–7 лет нарушения акта мочеиспускания встречаются у 20 % детского населения, а при достижении 14-летнего возраста их остается 2 % [2]. В среднем от 8 до 14 % детей всех возрастов страдают нарушениями акта мочеиспускания, в 80 % наблюдений их причиной является гиперактивный мочевой пузырь [14]. Запоры с энкопрозом или без него наблюдаются у 3 % дошкольников и у 1–2 % школьников. У 95 % детей, обратившихся по поводу запоров, не выявляется органического заболевания [5], [20]. В понятие «гиперактивный мочевой пузырь» (ГАМП) входят такие симптомы, как энурез, императивные позывы, императивное неудерживание мочи и поллакиурия [2], [9]. Дети с симптомами ГАМП обращаются за медицинской помощью к врачам различного профиля, точки зрения которых по поводу одних и тех же расстройств мочеиспускания не всегда совпадают. Это касается этиопатогенеза, терминологии, объема обследования, последо-

вательности применения диагностических методов, трактовки полученных данных, формулирования заключения и, что является наиболее важным, фармакотерапии ГАМП. Поскольку этиология и патогенез ГАМП до конца не ясны, лечение является симптоматическим и направлено на увеличение резервуарной функции мочевого пузыря и угнетение незаторможенных сокращений детрузора в фазу накопления. Для этих целей используется большое число препаратов: М-холинолитики (дриптан, детрузитол, спазмекс, солифенацин), альфа1-адреноблокаторы (кардура, дальфаз), а также пикамилон, пантогам, финибут, мезокарб, пирацетам, минирин, аминокислоты (таурин, глицин) и др. Показания к применению указанных препаратов в конкретной клинической ситуации сплошь и рядом носят неопределенный характер. Традиционно препаратами первого ряда являются М-холинолитики, поскольку именно функцией М-холинорецепторов определяются такие свойства мочевого пузыря, как способность поддерживать постоянное низкое давление и возможность накапливать определенный объем. Но тем не ме-

нее анализ применения антимиокардиальной терапии не оставляет сомнений в том, что проблема фармакологического лечения ГАМП далека от окончательного решения. ГАМП у детей является следствием гипоталамо-гипофизарной дисфункции. Следовательно, в его происхождении, помимо парасимпатической, не исключено участие симпатической нервной системы. Основной мишенью для симпатической нервной системы является сосудистая система мочевого пузыря. Имеются сообщения о вовлечении сосудистой системы в патогенез ГАМП у детей и обоснование его лечения альфа1-адреноблокаторами [1], [2], [3], [4], [7], [15], [17], [18], [19], [21]. Вероятно, что спазм сосудов микроциркуляторного русла и вызванная им ишемия детрузора нарушают функцию холинорецепторов и обуславливают появление дезадаптации и снижение функционального объема мочеиспускания.

В настоящее время стали появляться работы об участии симпатической гиперактивности и в формировании хронического колостаза [5].

В связи с тем что почти у половины детей ГАМП сочетается с запорами, представляется логичным, что и при ГАМП, и при хронических запорах первичной является симпатическая гиперактивность. Для уточнения данной гипотезы особый интерес представляет исследование вегетативной нервной системы (ВНС) у детей с сочетанными нарушениями функций тазовых органов.

Во взрослой практике известен достаточно точный лабораторный метод определения адренореактивности организма, который применяется преимущественно в кардиологической практике, но пока еще не получил широкого распространения. Это экспресс-метод определения адренореактивности организма – исследование адренореактивности мембран эритроцитов (АРМ), который разработан и внедрен Р. И. Стрюк и И. Г. Длусской в 1995 году [12]. Авторы, обследуя достаточно большую группу здоровых пациентов старше 18 лет, сделали вывод, что границей физиологической нормы АРМ является показатель 2–20 усл. ед., причем он стабилен в условиях привычного режима труда и отдыха. Выполнялись различные тесты в группах здоровых людей и лиц, страдающих гипертонической болезнью. Так, при проведении психоэмоциональных тестов показано, что величина АРМ, возрастая, адекватно отражает активность симпатoadреналовой системы, что подтверждается прямыми положительными корреляциями между частотой сердечных сокращений, артериальным давлением и АРМ. Показана связь между синдромом ранней реполяризации желудочков сердца (СРРЖ) и АРМ: у пациентов с СРРЖ показатель АРМ в среднем выше нормы и составляет 34,3 усл. ед. Заслуживает внимания исследование АРМ в условиях операционного стресса. Авторы исследовали пульс, артериальное давление и АРМ при проведении дистанционной литотрипсии у пациен-

тов с мочекаменной болезнью. По полученным результатам АРМ (6–75 усл. ед.) пациентов разделили на 3 группы (1-я – АРМ до 20 усл. ед., 2-я – 20–40 усл. ед., 3-я – более 40 усл. ед.); соответственно, показатели пульса и артериального давления в 3-й группе исходно выше, чем в 1-й и 2-й. Отмечено, что выраженность психоэмоциональных реакций, гиперемия кожи, мышечная дрожь, а также экстрасистолия нарастали по мере увеличения показателя АРМ, и если в 1-й группе экстрасистолы отмечены у 25 % пациентов, то в 3-й группе – практически у всех. При этом в 3-й группе нарушения сердечного ритма носили сложный характер: встречались полиморфные и групповые экстрасистолы. Таким образом, показана прогностическая роль АРМ в развитии аритмий в условиях психоэмоционального стресса. Представляет интерес прогностическая значимость АРМ у больных с острым коронарным синдромом. Так, у пациентов с инфарктом миокарда при низкой АРМ высокая вероятность развития осложнений или рецидива заболевания вследствие высокой чувствительности адренорецепторов к катехоламинам. При нестабильной стенокардии низкие показатели АРМ, напротив, являются благоприятным прогностическим критерием, косвенно указывая на роль других механизмов, исключающих значение высокой активности симпатoadреналовой системы [12]. Эту методику определения адренореактивности организма мы решили использовать у детей с сочетанными нарушениями функций тазовых органов как дополнение к общепринятым способам определения состояния ВНС.

МАТЕРИАЛ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Определение адренореактивности лабораторным методом выполнено 80 детям 4–15 лет (44 мальчика, 36 девочек). Из них 54 ребенка – это дети с сочетанными нарушениями функций тазовых органов, 26 детей составили контрольную группу. Дети с сочетанными нарушениями функций тазовых органов обследованы всесторонне: проведено урологическое, проктологическое и неврологическое обследование, в том числе исследование вариабельности сердечного ритма, при котором у всех детей группы выявлено гиперактивное состояние симпатической нервной системы. Дети контрольной группы – практически здоровые дети, им выполнялось исследование вариабельности сердечного ритма, при котором получены нормальные результаты, указывающие на хорошие адаптационные возможности сердечно-сосудистой системы.

Опишем методику определения адренореактивности. Метод основан на факте, что адреномиметики и адреноблокаторы, связываясь с адренорецепторами эритроцитов человека, изменяют степень гипоосмотического гемолиза. Сущность метода заключается в количественной оценке степени ингибирования гипоосмотического гемолиза эритроцитов в присутствии адреноблокатора. В контрольной пробе эритроциты

в гипоосмотической среде частично гемолизуются, степень гемолиза измеряют колориметрическим способом. В опытной пробе, содержащей в гипоосмотической среде адреноблокатор, эритроциты гемолизуются в меньшей степени вследствие связывания адреноблокатора клеточными рецепторами. Поэтому после осаждения центрифугированием негемолизированных клеток надосадочный слой в опытной пробе окрашен слабее, чем в контрольной [12].

Этапы определения адренореактивности организма по величине АРМ (по [12])

Реактивы и этапы проведения анализа	Контрольная проба, мл		Опытная проба, мл	
	Номер пробирки			
	1	2	3	4
Буферный раствор	2,5	2,5	2,5	2,5
Раствор адреноре-активного вещества	–	–	0,1	0,1
Дистиллированная вода	0,1	0,1	–	–
Перемешать				
Образец крови, разбавленной 1 : 1	0,05	0,05	0,05	0,05
Перемешать без пенообразования				
Инкубировать 15 минут при комнатной температуре				
Перемешать без пенообразования				
Инкубировать 15 минут при комнатной температуре				
Центрифугировать 10 минут при 1500 об./мин.				

Надосадочный слой переносят в кювету фотометра и измеряют величину оптической плотности контрольных и опытных проб против физиологического раствора при длине волны 540 (500–560) нм в кювете с толщиной поглощающего свет слоя 10 или 5 мм. Величину АРМ рассчитывают по формуле:

$$\text{АРМ} = \frac{E_{01} + E_{02}}{E_{к1} + E_{к2}} \times 100 \%,$$

где АРМ – величина показателя адренореактивности, усл. ед.; E_{01} и E_{02} – оптические плотности опытных проб, ед. опт. плотн.; $E_{к1}$ и $E_{к2}$ – оптические плотности контрольных проб, ед. опт. плотн.

Повышение осморезистентности эритроцитов под влиянием адреноблокаторов можно связать с регуляцией Na/H^+ - и Na/K^+ -обмена клетки. Ингибирование осмозиса эритроцитов зависит от количества функционально активных адренорецепторов на поверхности клеток и указывает на их адренореактивность. Эритроциты, отражая общие закономерности изменений мембранных и клеточных структур под действием катехоламинов, могут считаться адекватной моделью системных проявлений активности симпатoadренальной системы [6], [8], [10], [11], [12], [13]. Это послужило основанием считать адренореактивность эритроцитов системным показателем адренореактивности организма.

Метод оценки адренореактивности организма по влиянию адреноблокатора на осморезистент-

ность эритроцитов имеет следующие достоинства. Прежде всего он прост: определение АРМ с параллельными пробами у одного обследуемого выполняется одним лаборантом за 50 минут, серия анализов для 5 обследуемых – за 1,5 часа. Не требуется сложного оборудования и дорогостоящих реактивов. Результаты хорошо воспроизводимы: случайная погрешность метода, то есть различия между парными (параллельными определениями) составляет 0,33 ед. в группе со

средней величиной АРМ 12,2 ед. (при расчете

погрешности (S) по формуле: $S = \sqrt{\frac{\sum d^2}{2n}}$, где d – различие между параллельными определениями при n = 10 [12]).

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Данная методика у детей вообще и с сочетанными нарушениями функций тазовых органов в частности ранее описана не была. В нашей клинике определение адренореактивности мембран эритроцитов включено в программу обследования детей с сочетанными нарушениями функций тазовых органов с конца 2009 года. В нашей контрольной группе показатель адренореактивности составил 9,41 (1,5–18,8). Это позволяет предположить, что у детей норма АРМ практически не отличается от таковой у взрослых. У детей с сочетанными нарушениями функций тазовых органов показатель адренореактивности составил 49,73 (15,9–121,9) усл. ед. Дети с аритмиями и синдромом ранней реполяризации желудочков из исследования были исключены в связи с тем, что авторами методики показаны исходно высокие уровни АРМ у данной категории людей, а также с тем, что при наличии нарушений ритма сердца не проводилось исследование вариабельности сердечного ритма и возможности сопоставить результаты исследования симпатической нервной системы не было. Половых различий в контрольной группе и в группе детей с сочетанными нарушениями функций тазовых органов не отмечено: у мальчиков контрольной группы показатель адренореактивности составил 9,37 (1,5–18,8) усл. ед., у девочек – 9,46 (1,6–15,26) усл. ед., а в группе детей с сочетанными нарушениями функций тазовых органов у мальчиков показатель бета-адренореактивности – 49,04 (17,5–104) усл. ед., у девочек – 50,6 (15–121,9) усл. ед.

Как видно из представленных данных, у детей с сочетанными нарушениями функций тазовых органов максимальные показатели АРМ превышают значения у взрослых. На основании полученных результатов можно предполагать наличие высокого уровня активности симпатической нервной системы у детей с сочетанными нарушениями функций тазовых органов, что в целом укладывается в современные представления о патогенезе тазовых нарушений, однако

метод еще требует уточнения после увеличения количества наблюдений. Но в любом случае при сопоставлении с другими методами исследования вегетативной нервной системы у детей с сочетанными нарушениями функций тазовых органов удается получить схожие данные: высокая активность симпатического отдела вегетативной нервной системы при исследовании вариабельности сердечного ритма и низкие показатели тазового кровотока по данным реопельвиографии.

Таким образом, данная методика представляется пригодной для использования у детей. Складывается впечатление о ее высокой информативности в отношении диагностики симпатической гиперактивности при сочетанных нарушениях функций тазовых органов. Возможно, что на данном этапе изучения патогенеза сочетанных нарушений функций тазовых органов у детей полученные результаты исследования будут небольшим дополнением в пользу подтверждения гипотезы о наличии симпатической гиперактивности в широком смысле, одним из проявлений которой являются нарушения функций тазовых органов. В настоящее время методика

Р. И. Стрюк и И. Г. Длусской нами использована у детей с сочетанными нарушениями функций тазовых органов, но ее следует изучить и в отношении других патологических состояний.

ВЫВОДЫ

1. Определение АРМ у детей с сочетанными нарушениями функций тазовых органов является информативным исследованием симпатической нервной системы.
2. В качестве нормативных показателей АРМ у детей можно принять 1,5–18,8 усл. ед.
3. Результаты исследования АРМ у детей с сочетанными нарушениями функций тазовых органов позволяют подтвердить гипотезу о наличии симпатической гиперактивности у данной категории больных.
4. В совокупности с другими методами исследования вегетативной нервной системы определение АРМ может быть рекомендовано к применению у детей с дисфункциями тазовых органов; следствием этого должен стать правильный выбор лечебной тактики.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Вишневский Е. Л. Диагностика и лечение нейрогенных дисфункций мочевого пузыря у детей // Педиатрия. 1997. № 3. С. 42–44.
2. Вишневский Е. Л. Гиперактивный мочевой пузырь // Пленум правления Российского общества урологов. Тюмень, 24–27 мая 2005 г. Тюмень, 2005. С. 322–343.
3. Вишневский Е. Л., Джерибальди О. А. Лечение гиперактивного мочевого пузыря у детей альфа-адреноблокатором кардурой // Пленум правления Российского общества урологов. Тюмень, 24–27 мая 2005 г. Тюмень, 2005. С. 371.
4. Вишневский Е. Л., Джерибальди О. А. Роль нарушения пузырного кровообращения в патогенезе ГАМП у детей // Пленум правления Российского общества урологов. Тюмень, 24–27 мая 2005 г. Тюмень, 2005. С. 370.
5. Ленюшкин А. И., Ким Л. А., Рыжов Е. А., Цапкин А. Е. Эволюция взгляда на этиопатогенез хронических запоров у детей // Детская хирургия. 2009. № 6. С. 48–50.
6. Лукьянова Л. Д., Курлаев С. Н. О роли норадреналина в регуляции окислительного метаболизма миокарда крыс с разной резистентностью к гипоксии // Бюллетень экспериментальной биологии и медицины. 1992. № 12. С. 586–588.
7. Никитин С. С., Бережанская Т. И., Елагина Р. А. Новые направления диагностики и лечения нейрогенных дисфункций мочевого пузыря у детей // Медицинский академический журнал. 2005. Т. 5. № 2, прил. 6. С. 163–165.
8. Постнов Ю. В. О мембранной концепции первичной артериальной гипертензии (к развитию представлений о природе гипертонической болезни) // Кардиология. 1985. № 10. С. 63–71.
9. Пугачев А. Г., Кудрявцев Ю. В., Павлов А. Ю., Князькина О. М. Гиперактивный мочевой пузырь и морфологические изменения его слизистой оболочки у детей // Пленум правления Российского общества урологов. Тюмень, 24–27 мая 2005 г. Тюмень, 2005. С. 397–398.
10. Сапрыгин Д. Б., Серов Р. А., Каштэлян Л. С. и др. Реализуется ли повреждающее действие катехоламинов на миокард через гиперстимуляцию бета-адренорецепторов? // Бюллетень экспериментальной биологии и медицины. 1984. № 8. С. 175–177.
11. Свиридова Е. В., Щеголева Т. И., Бахова Л. К., Васильев И. М. Молекулярно-клеточные аспекты прогноза течения острого инфаркта миокарда // Кардиология. 1993. Т. 33. № 11. С. 58–60.
12. Стрюк Р. И., Длусская И. Г. Адренореактивность и сердечно-сосудистая система. М.: Медицина, 2003. С. 15–24.
13. Ульянинский Л. С. Эмоциональный стресс и экстракардиальная регуляция // Физиологический журнал. 1994. Т. 80. № 2. С. 23–33.
14. Урофлоуметрия. Справочное издание / Е. Л. Вишневский, Д. Ю. Пушкар, О. Б. Лоран, В. В. Данилов, А. Е. Вишневский. М.: Печатный Город, 2004. 220 с.
15. Ягафарова Р. К., Зубань О. Н. Альфа-адреноблокаторы (дальфаз) при нарушении резервуарной функции мочевого пузыря // Урология. 2001. № 3. С. 23–26.
16. Allen J., Rasmussen H. Some effects of vasoactive hormones on the mammalian red blood cells // Prostaglandins in cellular biology. N. Y., 1972. P. 27–51.
17. Athanasopoulos A., Gyfopoulos K. Combination treatment with an (α -blocker plus an anticholinergic for bladder outlet obstruction: a prospective, randomized, controlled study) // J. Urol. 2003. Vol. 169. P. 2253–2256.
18. Cain M. P., Wu S. D., Austin P. F., Herndon C. D. Alpha blocker therapy for children with dysfunctional voiding and urinary retention // J. Urol. 2003. Vol. 170. P. 1514–1515.
19. Golebiewski A. Selective α -blockers for treating dysfunctional voiding in children // XV ESPU Congress. Regensburg, 2004.
20. Idiopathic constipation and soiling in children. Ann Arbor (MI) // University of Michigan Health System. 1997. Vol. 5.
21. Petersen Th., Husted P. Sildenafil treatment of neurourological patients with detrusor hyperreflexia and bladder emptying disability // Scand. J. Urol. Nephrol. 1989. Vol. 23. № 3. P. 189–194.

МИХАИЛ МИХАЙЛОВИЧ ФИЛИПОВ

доктор геолого-минералогических наук, главный научный сотрудник лаборатории генезиса шунгитовых месторождений Института геологии, Карельский научный центр РАН

filipov@krc.karelia.ru

ЮЛИЯ ЕВГЕНЬЕВНА ДЕЙНЕС

младший научный сотрудник лаборатории генезиса шунгитовых месторождений Института геологии, Карельский научный центр РАН

deines@krc.karelia.ru

ТРАДИЦИОННЫЕ И ЭВРИСТИЧЕСКИЕ ПОДХОДЫ К ИНТЕРПРЕТАЦИИ ГЕОЛОГО-ГЕОФИЗИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ НА ПЕРСПЕКТИВНОМ ДЛЯ ОТКРЫТИЯ МЕСТОРОЖДЕНИЯ МАКСОВИТОВ УЧАСТКЕ ТОЛВУЙСКОЙ СИНКЛИНАЛИ

В статье рассмотрена гипотеза о вероятном открытии крупных залежей максовитов на территории Толвуйской синклинали Онежского синклинория. На участке «Тетюгино» выявлены прямые и косвенные признаки складки нагнетания. Диапировая модель значительно расширяет поисковые признаки месторождений шунгитоносных пород, поскольку этот тип складчатости имеет целый ряд характерных генетических особенностей.

Ключевые слова: Онежский синклинорий, шунгиты, максовиты, диапировые складки, генетические признаки

ВВЕДЕНИЕ

Месторождения высокоуглеродистых пород в Онежском синклинории (Карелия) представлены купольными телами, сложенными преимущественно максовитами, и субпластовыми телами шунгитов. (Максовиты и шунгиты – шунгитоносные (высокоуглеродистые) породы, содержащие соответственно 10–45 % и 45–80 % шунгитового вещества (углерода), плотные, пелитоморфные.) Месторождения стратиграфически приурочены ко второй пачке верхней подсвиты заонежской свиты людиковийского надгоризонта нижнего протерозоя. Закономерности строения купольных структур изучены на примере Максовского месторождения. Его размеры в плане – 600 x 800 м, мощность пород в центре – до 120 м, уровень эрозионного среза составляет примерно 1/5 предполагаемой начальной амплитуды купола. Особенности строения субпластовых тел шунгитов достаточно полно исследованы на примере месторождения Шуньга.

В диапировой модели [6] Максовское и Шуньгское месторождения представляют собой две разные стадии развития складок нагнетания по первичным органо-кремнистым и органо-глинистым отложениям: купол – промежуточную, а субпластовые тела – завершающую (экструзивную) стадию. Предположение о генетической близости двух месторождений базируется на том, что в пределах Максовского месторождения фиксируются локальные области, сложенные шунгитами, в перекрывающих шунгитоносных горизонтах, сохранившихся на

периферии месторождения, есть признаки экструзии вещества, по составу близкого к шунгиту, в вышележащие слои.

Гипотетические представления о генезисе месторождений, за исключением диапировой модели, к сожалению, не имеют развернутых доказательств. Однако и в этой модели не все положения в равной степени обоснованы, поскольку до настоящего времени не были известны объекты, на которых можно было бы исследовать апикальные части купольных структур, их предполагаемую трансформацию в субпластовые тела, особенности возможного тектонического воздействия на перекрывающие породы. В статье обсуждается гипотеза о вероятном существовании в Толвуйской синклинальной структуре Онежского синклинория (рис. 1) куполов, аналогичных Максовскому месторождению, но не разрушенных эрозией. Исследования проведены на участке «Тетюгино» (рис. 2), выбор которого был обусловлен тем, что на нем по ряду прямых и косвенных признаков прогнозировалась залежь максовитов и шунгитов. Рассмотрены два варианта интерпретации геолого-геофизических материалов. Первый включает построение разрезов на основании данных бурения и традиционных способах аппроксимации межскважинного пространства. Второй вариант предусматривает использование знаний об основных закономерностях развития складок нагнетания, теоретических и экспериментальных данных о системах купольных структур Толвуйской синклинали, анализ всей имеющейся геолого-геофизической информации.

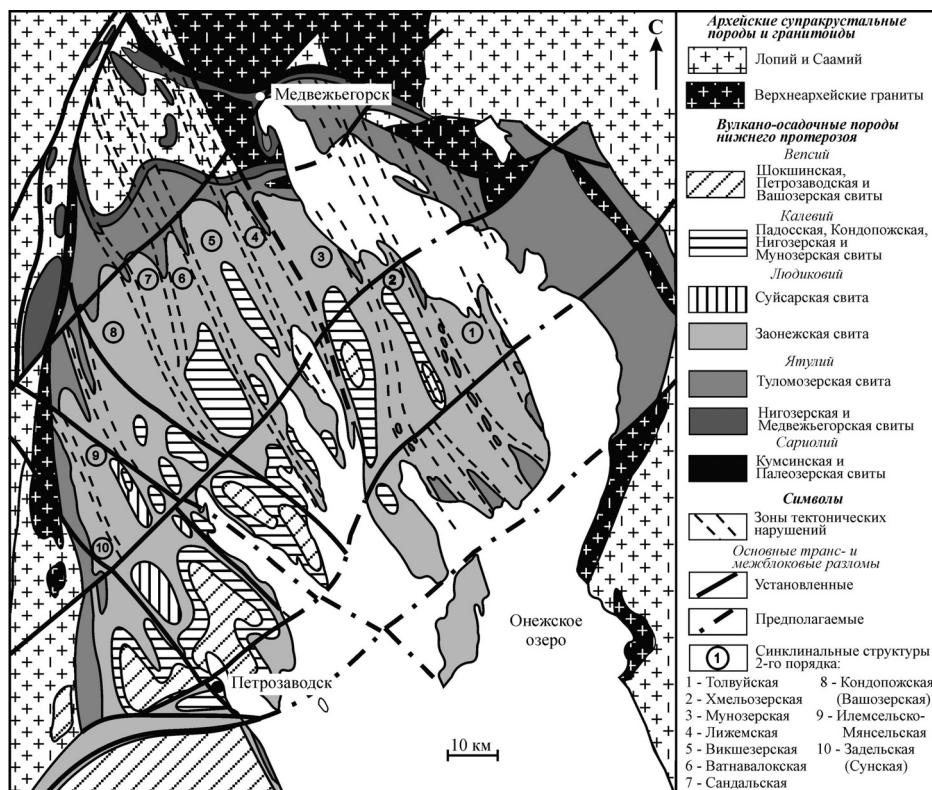


Рис. 1. Схема размещения структур 2-го порядка в Онежской синклинии [1] с изменениями

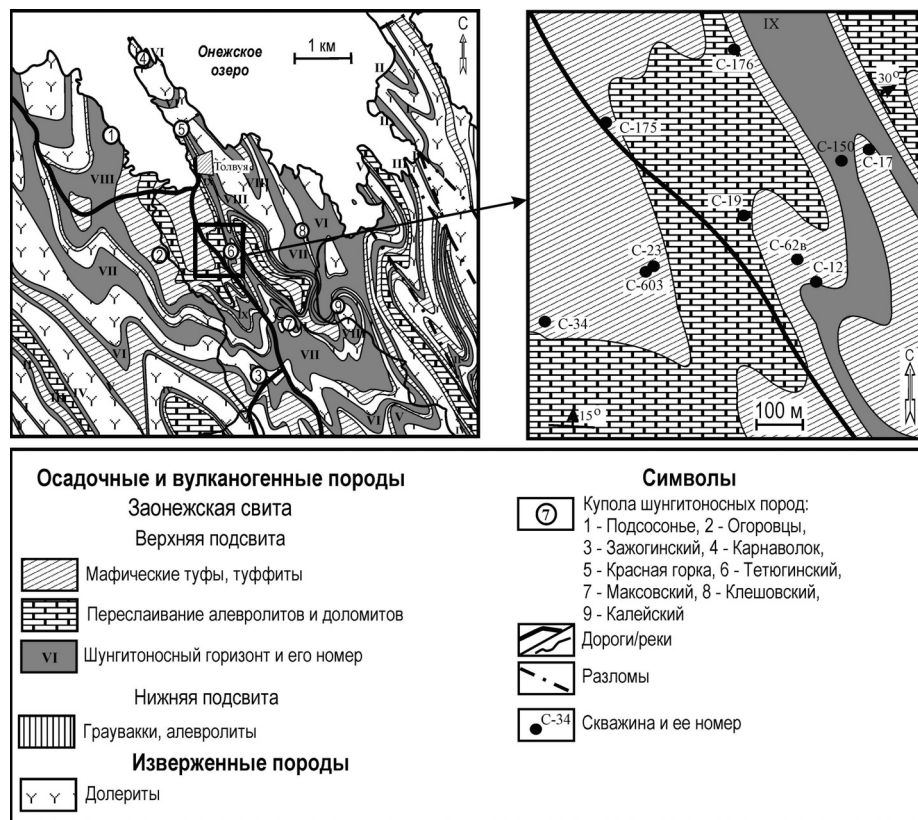


Рис. 2. Схема северной части Толвуйской синклинали [4] (на врезке – геологическая карта участка «Тетюгино» [3])

ОСНОВНЫЕ ДАННЫЕ ПО ГЕОЛОГИИ УЧАСТКА «ТЕТЮГИНО»

Шунгиты и максовиты в Онежском синклинории (структуре первого порядка) встречаются в осадочно-вулканогенном и вулканогенно-осадочном типах разрезов первой и второй пачек верхней подсвиты заонежской свиты людиковия. Первая пачка сложена песчаниками, алевролитами, сланцами с сульфидной вкрапленностью, отдельными прослоями и линзами карбонатных пород, покровами и потоками лав основного состава. В ней выделяются три горизонта шунгитоносных пород (1–3-й) мощностью от 10 до 20 м. Вторая пачка состоит из шести горизонтов шунгитоносных пород (4–9-й): шунгитоносные алевролиты, кварц-серицит-биотитовые породы, доломиты, лидиты, известняки, базальты и долериты. Туфопесчаники, туфоалевролиты, алевролиты и сланцы приурочены к подошве шунгитоносных горизонтов; в кровле обычно присутствуют карбонатные породы и лидиты, то есть каждый горизонт представляет собой субцикл трансгрессивно-регрессивного осадконакопления.

Участок «Тетюгино» расположен на расстоянии около 2 км к северо-западу от Максовского месторождения. Схематическая геологическая карта участка, заимствованная из работы [4], приведена на рис. 2.

В разрезе (рис. 3) выделены несколько реперных пластов, выдержанных на большей части синклинали, в том числе литолого-геохимический региональный репер 2, который в основном приходится на восьмой шунгитоносный горизонт; в научных публикациях [2], [9] его обычно называют «шунгит-лидит-доломитовым комплексом». Этот стратиграфический интервал сложен окремненными доломитами, лидитами с редкими прослоями известняков и максовитов, в которых отмечается повышенное содержание урана и фосфора.

Приповерхностный разрез большей части участка сложен породами, входящими в восьмой шунгитоносный горизонт: темно-серыми массивными среднезернистыми доломитами (7–8 м), лидитами с редкими будинами доломитов (5–6 м), темно-серыми массивными доломитами (1,5–2 м), слабо брекчированными максовитами

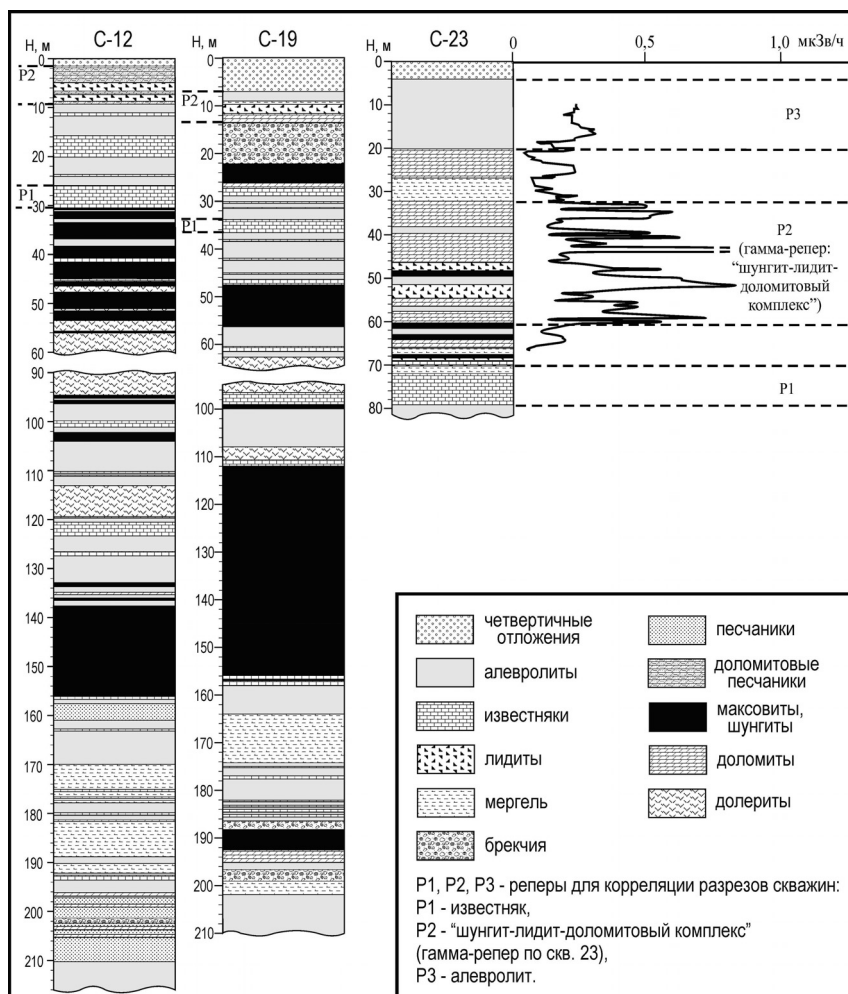


Рис. 3. Литологические колонки скважин центральной части участка «Тетюгино»

(8–10 м). На северо-западе в разрезе появляются алевролиты и шунгитоносные породы девятого горизонта. Естественные обнажения представлены сглаженными выступами лидитов («бараньими лбами»).

В структурном отношении участок находится на продолжении максовской антиклинали (структуры третьего порядка), ядро которой сложено осадочными породами второй пачки, входящими в 6–8-й шунгитоносные горизонты. Антиклиналь выражена в рельефе как протяженная гряда высотой до 30 м и длиной около 6 км, разделяющая две речные долины.

Геологический разрез участка, построенный только по данным бурения, приведен на рис. 4. Он мало отличается от разреза, приведенного в работе [4], поскольку принципы аппроксимации данных между скважинами одинаковы. В 1974 году залежь максовитов и шунгитов, вскрытая в пределах шестого шунгитоносного горизонта, была названа Мельничной, а ее прогнозные запасы оценены в 10 млн т. Как видно, в модели геологического строения участка, основанной на традиционном способе интерпретации геологических материалов, залежь представлена как простое локальное увеличение мощности шестого горизонта. Этот вариант не объясняет все полученные к настоящему времени материалы по геологии участка и не раскрывает вероятные способы формирования структуры, то есть не обладает эвристическим потенциалом.

ПРИЗНАКИ РАЗВИТИЯ ДИАПИРОВОЙ СТРУКТУРЫ НА УЧАСТКЕ «ТЕТЮГИНО»

Диапировая структура (структура 4-го порядка) проявляется в современном рельефе в виде областей пониженных отметок, опоясывающих с юга и северо-запада локальную область с относительно высокими гипсометрическими отметками.

На участке на естественных обнажениях и в скважинах зафиксированы крутые углы падения слоев (до 35°), нехарактерные для структур 3-го порядка Толвуйской синклинали. По данным бурения, мощность силла долеритов, разделяющего 6-й и 7-й горизонты, больше в области развития предполагаемой краевой синклинали (скв. 34 на рис. 4); наоборот, мощность 6-го горизонта в таких участках существенно меньше за счет предполагаемого выжимания вещества из этой области. В то же время мощность высокоуглеродистых пород этого горизонта резко увеличивается по направлению к предполагаемому центру складки (в скв. 12 – около 14 м, а в скв. 19 – уже 42 м; рис. 3).

Максовиты и шунгиты нередко имеют флюидальные текстуры, свидетельствующие о течении органоминерального вещества; на это же указывают обломки известняков и алевролитов в шунгитах, захваченные при перемещении пластичного материала из вмещающих пород (краевая брекчия). Содержание углерода в породах 6-го горизонта существенно превышает

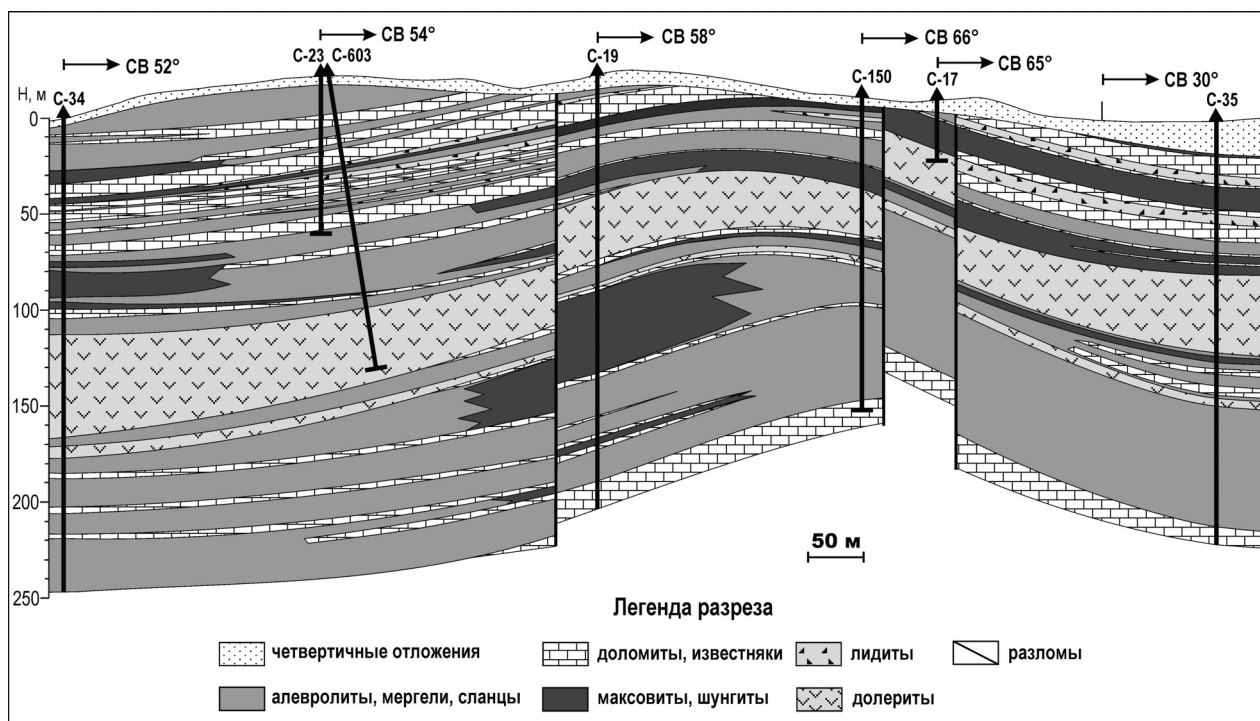


Рис. 4. Геологический разрез участка «Тетюгино»

фоновые концентрации: среднее – 46 %, максимальное – до 55 %. В диапировой модели образования месторождений максовского типа зональность в распределении углерода и минерального вещества объясняется дифференциацией органического минерального вещества по плотности в процессе развития складок нагнетания [7].

Рассмотрим теоретические предпосылки существования на участке купольной структуры. В теории диапиризма рассматриваются гравитационно-неустойчивые системы, состоящие из слоя легкого материала, расположенного под слоем относительно более тяжелого вещества [10]. Появление купола и краевой синклинали сопровождается распространением по питающему слою гравитационной неустойчивости, тем самым создается возможность формирования соседних куполов и системы генетически связанных структур с доминирующей длиной волны [13]. Для расчета расстояния между соседними куполами (длины волны) используют аналитические решения уравнения Навье – Стокса и ряд упрощающих условий [5]. Например, в трехслойной модели принимается: $\rho_1 = \rho_3 > \rho_2$, где ρ_1 , ρ_3 – плотность перекрывающих и подстилающих пород, ρ_2 – плотность питающего слоя; вязкость вещества $\mu_1 = \mu_3 > \mu_2$, мощность слоев $h_1 \gg h_2$, $h_3 \rightarrow \infty$. При этих условиях доминирующая длина волны зависит только от значений μ_1/μ_2 , μ_2/μ_3 , h_2 и $\Delta\rho = (\rho_1 - \rho_2)/(\rho_2 - \rho_3)$.

Оценка мощности питающего слоя, плотности и вязкости пород позволяет рассчитать вероятную длину волны для системы купольных структур, развивавшихся по 6-му горизонту. Например, при $\mu_2/\mu_1 = 5 \cdot 10^3$, $\Delta\rho \approx 1$, $h_2 = 40$ м она составляет 1600 м, а для $h_2 = 60$ м – 2400 м. Более точные ее значения оценить сложно, поскольку существует слишком много неопределенностей в расчете исходных параметров и трудно учесть их изменение во времени. В модели формирования купольных шунгитоносных структур принимается, что питающий слой – это первичный сапропелевый ил с алюмосиликатной, кремнистой и частично карбонатной минеральной основой. Вероятное время формирования Максовского купола – поздняя стадия диагенеза.

Для северной части Толвуйской синклинали экспериментально определено [8] расстояние между соседними куполами, сформированными по 6-му шунгитоносному горизонту. В среднем оно равно 1750 ± 50 м, то есть находится в интервале приведенной выше теоретической оценки. Следовательно, к северу-западу от Максовского месторождения примерно на этом расстоянии с высокой вероятностью мог быть сформирован аналогичный купол.

Таким образом, на участке выявлены структурные и литологические признаки формирования купольной структуры 4-го порядка. Она находится на том расстоянии от Максовского месторождения, которое соответствует теорети-

ческой оценке ведущей длины волны. Поскольку в разрезе помимо 6-го в полном объеме присутствуют 7-й и 8-й горизонты, то вполне очевидно, что купольное тело, в отличие от Максовской залежи, не подвержено эрозии.

ПРИЗНАКИ ВЛИЯНИЯ ПРОЦЕССОВ ФОРМИРОВАНИЯ КУПОЛЬНОЙ СТРУКТУРЫ НА ПЕРЕКРЫВАЮЩИЕ ПОРОДЫ

На участке установлены уступы рельефа высотой до 1,5 м, имеющие разную длину и направление и расположенные на разных гипсометрических отметках. На северо-востоке участка структура 3-го порядка трассируется относительно длинными линеamentами, а структура 4-го порядка – более короткими уступами с меняющимися на коротком интервале азимутами простирания. Уступы рельефа сложены лидитами и доломитами, в том числе сильно брекчированными на интервалах мощностью до 0,5 м. При расчистке уступов рельефа вскрыты два типа брекчий. Первый тип с округлыми обломками доломита («конгломерат», по В. И. Горлову, представленный рыхлой массой с сохранившимися от выветривания останцами доломита) можно отнести к типичной тектонической брекчии. Брекчии второго типа – лидиты, доломиты, известняки состоят из остроугольных обломков, смещенных от своего первоначального положения на некоторое расстояние и частично развернутых вокруг своей оси, что указывает на движение цементирующего флюида. Первая фаза цементации представлена остроугольными обломками шунгита, вторая – антраксолитом, цементирующим их. Такие брекчии были встречены также в скв. 19 на глубине 11,6–22,1 м и в скв. 12 – на 19–20 м. Цемент брекчий первого и второго типа – метакolloидное органическое вещество (шунгит) и углеводороды (антраксолит) может, вероятно, указывать на генетическую связь с процессом формирования диапирового тела, в котором дифференциация первичного органического и органического кремнистого вещества в апикальной части купола достигла своего предельного значения, и на активную генерацию углеводородов, приуроченную к завершающей стадии развития диапировой структуры. Предположение о связи брекчирования перекрывающих купол пород с развитием диапировой структуры подтверждается и тем, что интенсивность этого процесса затухает по мере удаления от предполагаемого центра купола. Вероятно, брекчии второго типа развивались лишь вблизи локальных разломов, образующихся в крышке при механическом воздействии купола или под влиянием повышенного давления. О существовании повышенного давления в диапировом теле свидетельствуют также признаки выжимания органического вещества из апикальной части купола в 7-й, 8-й и, возможно, 9-й шунгитоносные горизон-

ты (псевдобрекчии максовитов). Очевидно, что уступы представляют собой стенки долго живущих трещин растяжения, которые на завершающей стадии развития были заполнены экзотризивным материалом.

Обращают на себя внимание резко отличающиеся элементы залегания доломитов (простираение СЗ 330°, падение СВ 58°), характерные для северо-восточного крыла антиклинальной складки, и лидитов (простираение СВ 65°, падение ЮВ 70°). Это может быть связано с тем, что соседние блоки были смещены относительно друг друга и в ряде случаев, вероятно, развернуты по своей оси. Сохранность в рельефе уступов объясняется избирательной денудацией резко различных по устойчивости к размыву лидитов и доломитов. Таким образом, на участке есть область, отождествляемая с локальным горстом, очевидны признаки развития разломов, опоясывающих его, а также разломы внутри этой области, расходящиеся в виде лучей от предполагаемого центра.

На плане изолиний разности потенциалов естественного поля (ЕП) (рис. 5а) видны несколько обособленных участков с относительно низкими потенциалами, между которыми наблюдаются зоны относительно высоких значений dU . Высокие значения dU соответствуют доломитам, которые разделяют шунгитоносные горизонты. Сопоставляя полученную картину с известными геологическими сведениями по участку [3], [4], можно выделить 9–7-й шунгитоносные горизонты.

По данным электропрофилирования в модификации срединного градиента (СГ) (рис. 5б), в северо-западной части участка выделяется аномальная зона с отрицательными значениями $Ig \rho$. Можно предположить, что эта аномалия вызвана максовитами. С глубиной площадь зоны увеличивается. Она имеет форму полуовала, вытянутого по направлению, совпадающему с осью максовского вала. На этом основании мы можем предположить, что методом СГ фиксируется центральная часть диапировой структуры. Также по результатам СГ были построены геоэлектрические разрезы на глубину 30 м. Практически на всех разрезах выделяются вертикальные аномальные зоны с повышенным значением ρ , что, по нашему мнению, соответствует зонам разлома. Таким образом, через весь участок трассируются региональные разломы. Помимо выделенных зон, на некоторых разрезах, предположительно проходящих через купольную структуру, фиксируются также и другие разломы, скорее всего образовавшиеся в результате развития диапировой структуры, то есть локальные разломы.

По данным гамма-съемки, повышенными значениями мощности экспозиционной дозы выделяются локальные области, которые можно отождествить с отдельными блоками-грабенами.

Итак, по геоморфологическим признакам, проверенным путем расчистки уступов, а также по данным комплекса геофизических методов, наиболее правдоподобной может быть модель бло-

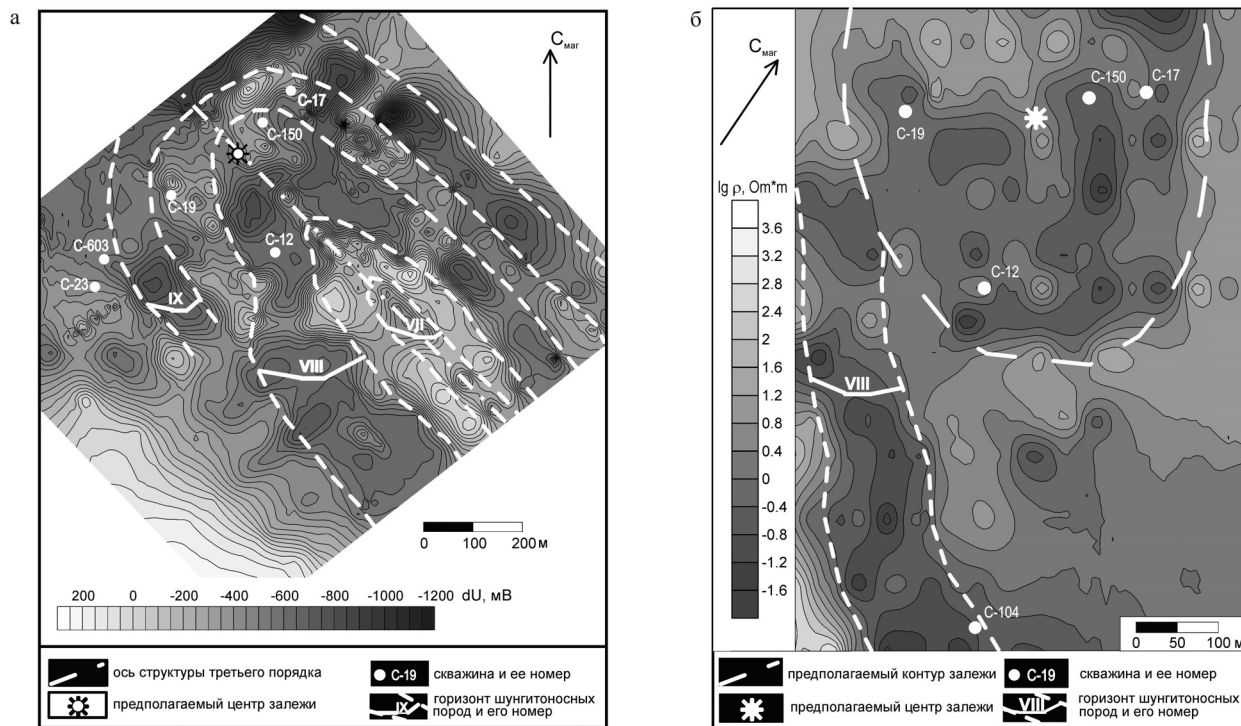


Рис. 5. Планы изолиний: а – разности потенциалов ЕП (dU , мВ); б – кажущегося удельного сопротивления $Ig \rho$ (Ом*м), рассчитанного на глубину $H = 16$ м

кового строения участка. Естественное обнажение лидитов отождествляется с одним из блоков, а многочисленные уступы рельефа – со сложной локальной горсто-грабеновой тектоникой.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ ИССЛЕДОВАНИЯ

Анализ материалов геолого-геофизического изучения участка позволяет утверждать, что здесь развита структура 4-го порядка и локальная блоковая тектоника, имеющая признаки, характерные для разломной тектоники диапировых структур. На рис. 6 показана наиболее вероятная модель строения участка «Тетюгино», учитывающая все приведенные в статье сведения.

Размеры отдельных блоков существенно меньше размеров купола, блоки смещены относительно друг друга по вертикали и развернуты на некоторый угол относительно оси купольного тела, причем азимуты поворота диаметрально противоположных блоков отличаются примерно на 180° . Между блоками развиты зоны брекчированных пород, в которых роль цемента выполняет метаколлоидное минеральное вещество. Под влиянием высокого давления в апикальной части диапирового тела на отдельных интервалах разреза вблизи от тектонических разломов

развивается особый тип брекчий. В ряде случаев органо-минеральное вещество было выжато из купола в перекрывающие горизонты с близкими реологическими свойствами, сформировало в них локальные области с повышенным содержанием углерода (диапировые многоуровневые шляпы), при этом в локальных разломах были образованы жилы шунгитов и максовитов.

Выявленные на участке «Тетюгино» следы развития локальной тектоники в общих чертах напоминают основные характерные признаки деформации покровов под влиянием диапировых соляных структур.

Известно, что над соляными купольными структурами формируется сложная система деформаций покровы, зависящая от формы купольного тела и вязкости материала. Пример деформации покровы над соляным штоком приведен в работе [11]. Система разломов состоит из двух симметричных, кольцевых, коаксиальных и многочисленных радиальных, линейных, расходящихся от центра разломов. В естественных условиях подобные зоны разломов очень сложны для картирования геофизическими методами, особенно сейсморазведкой, из-за многочисленных крутопадающих и слабоотражающих границ.

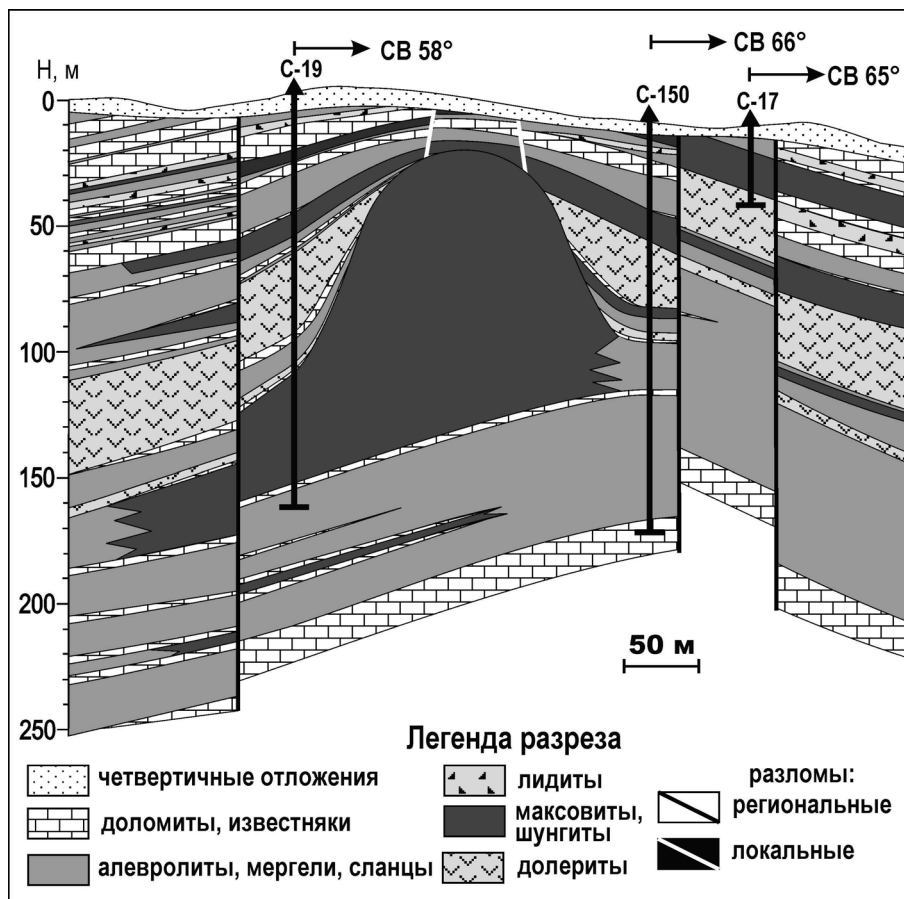


Рис. 6. Разрез участка «Тетюгино», построенный с использованием эвристического подхода

Физическое моделирование процесса [12] показало, что в покрывке формируется центральный горст, обрамленный симметрично расположенными грабенами; в плане размеры центрального горста значительно меньше, чем диаметр купольного тела; на периферии могут быть образованы грабены, развернутые вплоть до обратного залегания слоев; разломы могут быть как линейными, так и криволинейными; в плане зона разломов в 2–3 раза больше, чем диапировое тело; в сводовом горсте горизонтальное залегание перекрывающих пород сохраняется, в грабенах оно всегда нарушено, слои сильно деформированы. В определенных условиях хорошо выражены первичная и вторичная краевые синклинали, последняя – за счет частичного выдавливания вещества в краевые сбросы и в перекрывающие горизонты. Образование боковых апофиз из материала питающего слоя истощает его и ускоряет завершение развития диапировой структуры; в некоторых случаях могут формироваться несколько диапировых шляп небольшого размера.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Итак, на участке «Тетюгино» существуют прямые и косвенные признаки купольного тела, генезис которого рассматривается в рамках диапировой модели. Прямые признаки: приуроченность структуры 4-го порядка к антиклинали 3-го порядка; ее форма; более высокая мощность перекрывающих слоев на крыльях структуры; литологические особенности пород 6-го горизонта, фиксирующие дифференциацию органоминерального вещества по плотности, то есть характерную для диапировых структур зональ-

ность в распределении углерода; локальные разломы и относительное смещение по вертикали отдельных блоков; экструзии органоминерального вещества из купола в перекрывающие горизонты. Косвенные признаки – геофизические и геоморфологические, отражающие отмеченные структурные и литологические особенности участка.

Мельничная залежь шунгитов и максовитов по объему, вероятно, превосходит Максовское месторождение. Ожидаемые запасы составляют примерно 30–35 млн т. В практическом отношении залежи этого типа интересны и тем, что в них должна быть выше доля шунгитов, а значит, породы могут быть использованы в новых промышленных технологиях. Открытые экструзии, заполняющие центральные части трещин растяжения, могут в ряде случаев представлять практический интерес.

В Толвуйской синклинали можно прогнозировать другие аналогичные залежи, не разрушенные эрозией. Очевидно, что приведенный в статье подход к анализу геологической информации может быть распространен и на другие синклинальные структуры Онежского синклинория. Ранее при ведении разведочных работ можно было уверенно пользоваться лишь одним поисковым признаком – стратиграфической приуроченностью известных месторождений максовитов и шунгитов к первой и второй пачкам верхней подсвиты заонежской свиты. Диапировая модель значительно расширяет поисковые признаки, поскольку складки нагнетания, сформированные по органо-глинам, имеют целый ряд характерных генетических особенностей, которые меняются по горизонтали и вертикали.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Билибина Т. В., Мельников Е. К., Савицкий А. В. О новом типе месторождений комплексных руд в Южной Карелии // Геология рудных месторождений. 1991. № 6. С. 3–14.
2. Геология шунгитоносных вулканогенно-осадочных образований протерозоя Карелии / Под ред. В. А. Соколова. Петрозаводск, 1982. 208 с.
3. Горлов В. И. Геологическая характеристика района работ. Тетюгинский участок // Отчет по т. № 30 «Разработка технологии и геологическое изучение шунгитовых пород как комплексного сырья». Петрозаводск, 1967. С. 59–65.
4. Купряков С. В., Михайлов В. П. Отчет о результатах поисково-оценочных работ на шунгитовые породы, проведенных на Зажогинском и Фоймогубском участках в 1972–1974 гг.: Фонды ККГРЭ, ПГО «Севзапгеология». Петрозаводск, 1974. 150 с.
5. Рамберг Х. Сила тяжести и деформации в земной коре. М.: Мир, 1985. 399 с.
6. Филиппов М. М. Модели формирования месторождений шунгитоносных пород Онежского синклинория: Дисс. ... д-ра геол.-минерал. наук. Петрозаводск, 2000. 310 с.
7. Филиппов М. М. Шунгитоносные породы Онежской структуры. Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2002. 282 с.
8. Филиппов М. М., Клабуков Б. Н., Суханов А. В. Экспериментальное определение основных параметров систем купольных шунгитоносных структур Толвуйской синклинали // Российский геофизический журнал. 2004. № 3. С. 25–30.
9. Шунгиты Карелии и пути их комплексного использования / Под ред. В. А. Соколова, Ю. К. Калинина. Петрозаводск, 1975. 240 с.
10. Biot M. A., Ode H. Theory of gravity instability with variable overburden and compaction // Geophysics. 1965. Vol. 30. P. 213–227.
11. Brinkman R., Löfchers H. Diapirs in western Pyrenees and Foreland, Spain // Diapirism and diapirs / Eds. J. Braunstein, G. O'Brien. Tulsa, 1968. P. 275–292.
12. Davison I., Insley M., Harper M., Weston P., Blundell D., McClay K., Quallington A. Physical modeling of overburden deformation around salt diapirs // Tectonophysics. 1993. Vol. 228. P. 255–274.
13. Selig F. A theoretical prediction of salt dome patterns // Geophysics. 1965. Vol. 30. P. 633–643.

АЛЕНА СЕРГЕЕВНА МАЙОРОВАаспирант кафедры зоотехнии, товароведения и экспертизы продовольственных товаров агротехнического факультета, Петрозаводский государственный университет
*alena07071975@mail.ru***АНАТОЛИЙ ЕФРЕМОВИЧ БОЛГОВ**доктор сельскохозяйственных наук, профессор, заведующий кафедрой зоотехнии, товароведения и экспертизы продовольственных товаров агротехнического факультета, Петрозаводский государственный университет
bolg@psu.karelia.ru

РЫНОК РЫБНОЙ ПРОДУКЦИИ В РЕСПУБЛИКЕ КАРЕЛИЯ

Исследовано современное состояние и перспективы развития рынка рыбной продукции. Установлено, что динамичный рост аквакультуры в Республике Карелия способствует расширению ассортимента рыбной продукции, более полному удовлетворению потребности населения в данном продукте, снижению доли импортной рыбной продукции.

Ключевые слова: рыбоводство, рыба, садковое форелеводство, рынок рыбной продукции, потребление рыбы

Рыба является основным продуктом, который входит в обязательный рацион каждого человека, так как она способна удовлетворить основные потребности в белках, жирах (липидах), углеводах, минеральных веществах. По энергетической ценности мясо рыбы почти не уступает мясу убойных животных. Рыбные продукты отличаются хорошими диетическими свойствами. После тепловой обработки мясо рыбы становится сочным, рыхлым, легко пропитывается пищеварительными соками, что способствует лучшему перевариванию и усвоению организмом человека.

Белки мяса рыбы по сравнению с белками мяса теплокровных животных отличаются высокой усвояемостью (до 97 %). Это обусловлено тем, что миозин мяса рыбы, составляющий основную массу белковых веществ мышечной ткани, легче подвергается денатурации под влиянием нагревания и скорее переваривается в желудочно-кишечном тракте человека, чем миозин мяса наземных животных [12]. Жиры рыб превосходят жиры наземных животных по содержанию ценных полифеновых жирных кислот, которые легко усваиваются, способствуют снижению холестерина в крови человека. Мясо рыбы богато минеральными веществами, поэтому оно является одним из наиболее важных их источников для организма человека. Рыбные продукты обладают не только высокой пищевой ценностью, диетическими свойствами, но и способствуют укреплению здоровья, профилактике заболеваний и повышению работоспособности человека. Несмотря на то что на территории России находится огромное количество морей, рек, озер и других внутренних водоемов, спрос населения страны на рыбные продукты удовлетворяется не полностью.

С 1980 по 2000 год потребление рыбных продуктов в Российской Федерации сократилось

в 2,3 раза (с 23 до 10 кг при норме 19 кг на душу населения в год) [10]. В «нулевые» годы потребление рыбы возросло и в 2008 году составило 15 кг на душу населения (рис. 1), что все же ниже нормы.

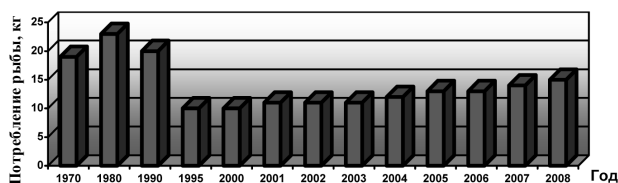


Рис. 1. Потребление рыбы и рыбопродуктов в РФ на душу населения в год, кг

Согласно положениям Доктрины продовольственной безопасности Российской Федерации, норма среднелюдиного потребления рыбы и рыбопродуктов составляет 18–22 кг в год [6].

Целью нашего исследования было изучение состояния рынка и путей повышения уровня обеспеченности населения Республики Карелия и других регионов рыбой и рыбной продукцией. Материалом для исследования служила нормативная, литературная и статистическая информация.

Основными источниками производства рыбы и рыбной продукции являются: морское и океаническое рыболовство; рыболовство на внутренних водоемах; аквакультура на внутренних водоемах.

Потенциальный объем российского рыболовства оценивается сейчас в 8,2–8,3 млн т [12]. В него входят ресурсы не только собственной зоны и внутренних водоемов, но также открытых вод и иностранных зон. Однако фактический вылов не превышает 4,3 млн т, то есть составляет немногим более 50 % потенциального объема. Это происходит потому, что Россия практически прекратила промысел в открытых водоемах. В табл. 1 представлены данные по

Таблица 1

Улов рыбы в пресноводных водоемах в отдельных субъектах
Российской Федерации в 2008 году

Субъект РФ	Улов рыбы в пресноводных водоемах, всего, т	в том числе, т					
		в озерах	в реках	в водохра- нилищах	в прудовых рыбоводных хозяйствах	в товарных озерных хозяйствах	в садковых и бассейновых хозяйствах
РФ	211 952	15 974	120 556	4444	50607	4556	8244
Северо-Западный федеральный округ	19 643	5658	268	135	448	–	6663
Республика Карелия	7950	1192	25	–	174	–	6559
Республика Коми	93	1	92	–	–	–	–
Архангельская область	48	7	41	–	–	–	–
в том числе Ненецкий авто- номный округ	48	7	41	–	–	–	–
Вологодская область	822	597	90	135	–	–	–
Калининградская область	6374	2	–	–	–	–	–
Ленинградская область	436	436	–	–	–	–	–
Мурманская область	143	20	20	–	–	–	103
Новгородская область	1380	1147	–	–	233	–	–
Псковская область	2397	2256	–	–	41	–	–

объему улова рыбы в пресноводных водоемах в отдельных субъектах РФ.

В 2008 году в целом в России выловлено всего около 212 тыс. т рыбы, что намного ниже потенциала пресноводных водоемов страны [10]. Из них выращено в садковых и бассейновых хозяйствах 8244 т рыбы.

Карелия по улову рыбы и добыче водных биоресурсов в Северо-Западном федеральном округе занимает четвертое место после Мурманской, Калининградской и Архангельской областей, а в России – девятое место [10]. В 2008 году улов рыбы в РК в пресноводных водоемах составил 7950 т, в том числе в прудовых рыбоводных хозяйствах выращено 174 т, в садковых и бассейновых хозяйствах – 6559 т (табл. 2) [8], [10].

В 2009 году в рыбной отрасли Карелии осуществляли деятельность 380 хозяйствующих субъектов, в том числе: океаническое рыболовство – 31, рыболовство на внутренних водоемах – 349 (на Белом море – 35, на пресноводных водоемах – 266, товарное рыбоводство – 45, береговая переработка – 3). Средняя численность занятых в отрасли составила 3,1 тыс. человек [3].

В период с 2004 по 2008 год в РК увеличился улов рыб семейства сельдевых на 75 %, однако по другим семействам рыб, кроме пикши, произошло значительное сокращение объемов улова (табл. 3) [8]. Развитие товарного рыбоводства в республике определено как одно из основных направлений рыбохозяйственной деятельности на внутренних водоемах.

Таблица 2

Улов и выращивание рыбы в пресноводных
водоемах в Республике Карелия
в 2004–2008 годах

Год	Улов рыбы в пресно- водных водоемах, всего, т	В том числе, т			
		в озерах	в реках	выращено в прудовых и других рыбоводных хозяйствах	
				в прудо- вых ры- боводных хозяйст- вах	в садковых и бассейно- вых хо- зяйствах
2004	2828	1371	21	120	1316
2005	3726	1388	13	167	2158
2006	5436	2194	25	214	3003
2007	6519	2362	15	192	3950
2008	7950	1192	25	174	6559

Наиболее перспективным направлением аквакультуры является садковое форелеводство. Рентабельность производства и оказываемая государственная поддержка способствуют интенсивному развитию данного направления рыбохозяйственной деятельности.

За последние 10 лет объем товарного рыбоводства в Карелии увеличился в 12 раз, за последние 5 лет – в 3 раза (табл. 2, 3) [8]. В настоящее время в Карелии на акватории 69 водоемов производится около 70 % российской форели [7]. Общая емкость рынка форели в России составляет порядка 63 тыс. т, при этом доля импортной продукции держится на уровне 85 % (около 55 тыс. т) [11].

Таблица 3

Улов и выращивание рыбы по видам в Республике Карелия в 2004–2008 годах, т

Семейство рыбы	Вид рыбы	Год				
		2004	2005	2006	2007	2008
Сельдевых	Сельдь	5160	5896	5735	7731	9523
	Сардины	287	–	–	–	–
Зубатковых	Зубатка	3298	491	433	562	612
Окуневых	Судак	27	14	13	1	4
Карповых	Лещ	10	9	11	–	2
Щуковых	Щука	2	2	3	–	–
Скумбриевых	Скумбрия	2128	1298	1335	1058	1229
	Тунец	7	–	–	–	–
Скорпеновых	Морской окунь	1460	936	1198	1037	558
Спаровых	Морской карась	6	–	–	–	–
Ставридовых	Ставрида	2482	–	–	–	–
	Камбала	338	406	349	240	294
Камбаловых	Палтус	529	205	229	175	214
	Сиговые	71	114	219	249	126
Лососевых*	Лососевые (кроме сиговых)	1314	2259	3049	4108	5411,6
Тресковых	Треска	19 951	19 458	18 755	17 709	18 413
	Минтай	–	–	90	–	–
	Пикша	5688	5024	5165	6670	6959
Прочие семейства	Прочая рыба	9035	8780	12 041	6451	8285

Примечание. * – выращено в садковых хозяйствах.

В 2009 году в рамках ведомственной целевой программы «Развитие форелеводства в Республике Карелия на период до 2010 года» планировалось вырастить 10,5 тыс. т разновозрастной форели. Фактически рыбоводными форелевыми хозяйствами выращено 12 950,3 т разновозрастной рыбы, в том числе 8765,6 т товарной рыбы. По сравнению с 2008 годом объем выращенной рыбы в 2009 году увеличился на 753,1 т, или на 6,2 %. Изменилась и структура выращенной рыбы: в 2009 году в Карелии рыбоводы выращивают не только форель озерную садковую (96,5 % к общему объему выращенной разновозрастной рыбы), но и нельму (0,8 %), сига (2,3 %) и палию (0,4 %) [4].

Республика обладает высоким потенциалом и для дальнейшего увеличения объемов садкового форелеводства, поэтому карельская форель может уже в ближайшее время значительно потеснить импортную рыбопродукцию из Норвегии и Чили и занять заметную долю в соответствующем сегменте российского рыбного рынка. По данным статистики, только за 2008 год деятельность форелеводческих хозяйств Карелии пополнила бюджет более чем на 20 млн руб.

Важным направлением рыбохозяйственной деятельности является переработка рыбы. Структура ассортимента по производству товарной рыбной продукции и морепродуктов в РК представлена в табл. 4 [5].

Таблица 4

Структура ассортимента по производству товарной рыбной продукции и морепродуктов в РК, т

Наименование	2007 год	2008 год	2008 год к 2007 году, %
Рыба охлажденная (без сельди)	6590	8576	130,1
Рыба мороженая (без сельди)	23 524	22 398	95,2
Рыба спецразделки (без сельди)	6	7	104,7
Филе рыбное мороженое (без сельди)	1917	1510	78,7
Рыба соленая (без сельди)	100	87	86,5
Сельдь всех видов обработки	10 157	14 490	142,7
Рыба копченая (без сельди)	144	121	84,0
Рыба сушено-вяленая	21	45	214,3
Рыба пряного посола и маринованная (без сельди)	42	64	152,4
Изделия кулинарные	7619	6618	86,9
Фарш пищевой	2267	2991	131,9
Икра	65	41	63,8
Консервы и пресервы рыбные и из морепродуктов, туб	665	804	120,8

Для увеличения объемов производства рыбной продукции и расширения ассортимента на перерабатывающих предприятиях проводится реконструкция и модернизация существующих производственных мощностей. В 2008 году инвестиции в основной капитал предприятий рыболовства и рыбоводства составили 122,7 млн руб. (рис. 2) [8].

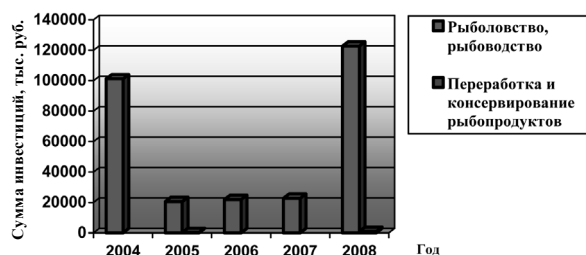


Рис. 2. Инвестиции в основной капитал предприятий рыболовства и рыбоводства в РК (без субъектов малого предпринимательства)

На перерабатывающих предприятиях республики в последние годы выпускаются новые виды продукции, пользующиеся повышенным спросом у населения: форель радужная охлажденная, мороженая, слабосоленая, подкопченая в различных видах упаковки, консервы и пресервы из форели, кулинарные изделия.

В 2008 году изменилась структура ассортимента рыбной товарной продукции в розничной торговой сети РК, произошло снижение спроса потребителей на живую рыбу и повышение спроса на переработанную рыбную продукцию, а также икру (табл. 5) [4].

Таблица 5

Ассортиментная структура розничной
продажи рыбной товарной продукции
в 2008 году

Наименование	2007 год, %	2008 год, %
Рыба живая (без сельди)	46,4	1,7
Рыба охлажденная (без сельди)	–	5,9
Рыба мороженая (без сельди)	–	7,2
Филе рыбное мороженое (без сельди)	6,9	3,4
Рыба соленая (без сельди)	7,2	23,6
Сельдь соленая	15,4	4,8
Рыба сушено-вяленая	4,7	5,0
Рыба копченая (включая сельдь)	12,1	9,3
Икра	0,6	15,9
Морепродукты пищевые	5,0	22,6
Прочие виды рыбной товарной продукции	1,7	0,6
Всего	100	100

В 2009 году по сравнению с 2008 годом в объеме товарной пищевой рыбной продукции вырос удельный вес производства филе мороженого, что указывает на наращивание организациями рыбохозяйственного комплекса производства рыбопродукции с более углубленной переработкой [3].

Ценовая конъюнктура на рыбу и рыбопродукты на продовольственном рынке в республике зависит от многих факторов: общих социально-экономических тенденций, инфляции, издержек производства, конкуренции, уровня спроса и потребления рыбной продукции населением, состояния ресурсных возможностей формирования рынка продовольствия. В связи со всеми вышеперечисленными факторами в 2008 году произошло изменение цен производителей на рыбную продукцию, в частности: рыба соленая, маринованная, копченая подорожала на 31 %, рыба охлажденная – на 25,7 %, икра лососевых рыб – на 21,4 %; рыба замороженная неразделанная подешевела на 5,9 % [5].

В 2008 году органами Управления Федеральной службы по надзору в сфере прав потребителей и благополучия человека по РК проводились проверки качества товаров, в том числе рыбной продукции, поступившей на потребительский рынок РК. В ходе проверок был выявлен лишь 1 % отечественной рыбной товарной продукции ненадлежащего качества от общего количества отобранных образцов, что более чем в 20 раз лучше показателей предыдущего года [5].

По данным 2008 года, рыба и рыбопродукты занимают наибольший удельный вес (78 %) в экспорте продовольственных товаров РК. В натуральных показателях экспорт рыбы и морепродуктов составляет 15 762,6 т. Главными потребителями рыбы и рыбопродуктов из РК являются жители Виргинских островов, Панамы, Норвегии, Китая, Багам (табл. 6) [2].

Таблица 6

Экспорт рыбы и рыбопродуктов
из Республики Карелия

Страны-партнеры	2006 год		2007 год		2008 год	
	Тонн	Удельный вес, %	Тонн	Удельный вес, %	Тонн	Удельный вес, %
Багамы	–	–	440,7	2,7	1591,0	10,1
Виргинские острова	3384,9	27,0	5888,4	36,5	4744,3	30,1
Китай	4027,4	32,2	2833,7	17,6	2027,0	12,9
Норвегия	3312,3	26,5	2308,6	14,3	2051,2	13,0
Панама	707,1	5,6	3517,5	21,8	4567,2	29,0
Другие страны	1080,7	8,7	1135,8	7,1	781,9	4,9
Всего	12 512,4	100	16 124,7	100	15 762,6	100

Основная доля в структуре импорта продовольствия в Карелии также приходится на рыбу и морепродукты (61,6 %). Товары данной группы поступают в республику в подавляющем большинстве из Норвегии и Чили [2].

В 2008 году ввоз рыбной товарной продукции в РК по сравнению с предыдущим годом сократился в 13 раз, однако ввоз рыбных консервов и пресервов увеличился в 3 раза (рис. 3) [1].

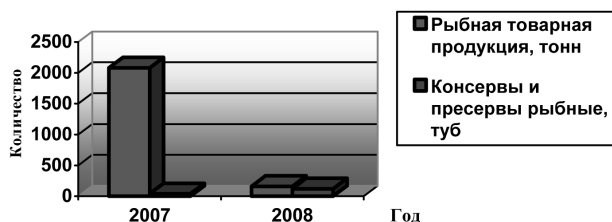


Рис. 3. Ввоз рыбной продукции на территорию РК

В 2009 году поставки рыбной продукции на внутренний рынок и иностранным потребителям составили 67,5 тыс. т. На экспорт было поставлено 13,5 тыс. т, российским потребителям – 54,0 тыс. т. К уровню 2008 года общий прирост объема поставок рыбной продукции составил 7,2 тыс. т, или 11,9 %. При этом объем поставок на российский рынок увеличился на 9,6 тыс. т и составил 121,6 % к уровню прошлого года, поставки на экспорт снизились на 2,4 тыс. т – 84,8 % к уровню прошлого года. Уменьшение экспорта поставок рыбы и рыбопродукции произошло вследствие снижения мировых цен на эти виды товаров почти в два раза.

Основные объекты экспорта – треска и пикша мороженые, филе мороженое тресковых видов рыб. В структуре экспорта в натуральном выражении на их долю приходится 81,6 % (в 2008 году – 72,8 %, в 2007-м – 92,4 %). Основными потребителями в 2009 году являлись Норвегия, Китай, Британские Виргинские острова. На долю этих стран в 2009 году пришлось 90,9 % (в 2008 году – 85,0 %) от общего объема экспорта в натуральном выражении.

В рамках межрегионального сотрудничества осуществлялись поставки в Москву, Санкт-Петербург и Ленинградскую область, Мурманск. Суммарный объем поставок товарной пищевой рыбной продукции, включая консервы, в данные регионы составил в 2009 году 32,0 тыс. т (в 2008 году – 34,1 тыс. т), в том числе в Москву – 0,7 тыс. т (в 2008 году – 0,3), в Санкт-Петербург и Ленинградскую область – 7,8 тыс. т (в 2008 году – 10,4), в Мурманск – 23,5 тыс. т (в 2008 году – 23,4). На потребительский рынок Карелии поставлено 14,8 тыс. т рыбопродукции, что выше уровня 2008 года в 3,5 раза. На данный факт повлияло решение НП «Союз рыбопромышленников Карелии» об увеличении сбыта продукции предприятий, входящих в состав этой общественной организации, на территории республики в связи с ростом потребительского спроса на рыботовары морского происхождения [3].

Анализ уровня потребления населением основных продуктов питания свидетельствует о том, что в Карелии увеличилось потребление мяса убойных животных и птицы, рыбы и рыбопродуктов, сыров, сметаны, мороженого, фруктов консервов. Потребление рыбы и рыбопродуктов в РК превышает российские показатели: потребление рыбной продукции в среднем на душу населения в РФ составляет 15 кг, в Карелии – 27 кг в год (рис. 4) [9], [10].

Таким образом, представленные материалы свидетельствуют о том, что спрос населения на рыбу и рыбопродукты может быть удовлетворен прежде всего за счет увеличения улова в реках и озерах, выращивания товарной форели, добычи океанической рыбы, создания условий для продвижения рыбных товаров на внутренний рынок. Для расширения ассортимента и удовлетворения потребности населения в некоторых океанических видах рыб, морепродуктах, рыбных полуфабрикатах, отдельных видах рыбных консервов целесообразны их поставки из-за пределов Карелии.

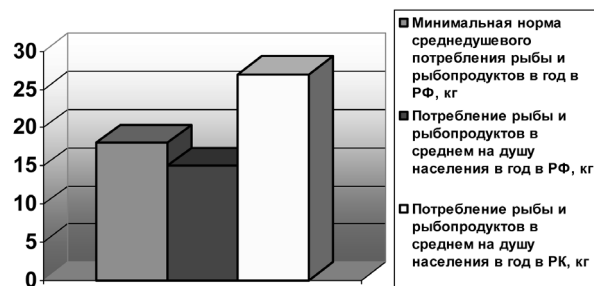


Рис. 4. Среднедушевое потребление рыбы и рыбопродуктов в 2008 году

Развитие рынка рыбной продукции в Карелии сдерживается наличием ряда проблем, в большей мере идентичных общим проблемам развития рыбохозяйственного комплекса России.

Среди основных внутренних проблем можно выделить следующие: дефицит в оборотных средствах, сокращение государственной поддержки, низкий уровень инвестиционной активности, недостаточное развитие и необходимость совершенствования системы маркетинга.

Реализация программных мероприятий по рыболовству требует проведения соответствующих мер, которые должны быть увязаны с государственной политикой, проводимой как в Карелии, так и в Северном бассейне. Она должна предусматривать:

- расширение уровня освоения внутренних водоемов Карелии малыми предприятиями;
- переориентацию рыбохозяйственной деятельности в регионе на повышение степени переработки добываемого сырья и его комплексного использования;
- сохранение высокого удельного веса экспорта в общих объемах производства пищевой продукции при одновременном расширении поставок рыбных товаров на внутренние рынки России.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ввоз потребительских товаров и продукции производственно-технического назначения в Республику Карелия в 2008 году: Статистический бюллетень / Карелиястат. Петрозаводск, 2009. 22 с.
2. Внешняя торговля в Республике Карелия: Аналитическая записка / Карелиястат. Петрозаводск, 2009. 28 с.
3. Министерство сельского, рыбного хозяйства и экологии РК. Управление рыбного хозяйства // Рыбное хозяйство РК в 2009 году. Цифры и факты – 2010 г. [Электронный ресурс]. Режим доступа: http://mcx.karelia.ru/ribnoe_hozyaistvo/informatsiya_o_rabote_otrasli.html
4. О состоянии продовольственного рынка в Республике Карелия: Доклад / Карелиястат. Петрозаводск, 2009. 49 с.
5. О состоянии розничной торговли Республики Карелия в 2008 году: Аналитическая записка / Карелиястат. Петрозаводск, 2009. 28 с.
6. Приказ Министерства здравоохранения и социального развития Российской Федерации «Об утверждении рекомендаций по рациональным нормам потребления пищевых продуктов, отвечающим современным требованиям здорового питания» от 2 августа 2010 г. № 593н.
7. Рыжков Л. П., Кучко Т. Ю. Садковое рыбоводство. Петрозаводск: Изд-во ПетрГУ, 2008. 164 с.
8. Территориальный орган Федеральной службы государственной статистики по Республике Карелия [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://krl.gks.ru>
9. Торговля Республики Карелия: Статистический сборник / Карелиястат. Петрозаводск, 2009. 173 с.
10. Федеральная служба государственной статистики // Российский статистический ежегодник – 2009 г. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://www.gks.ru>
11. Филатова Е. Карельская форель завоевывает рынок // Fishnews – новости рыболовства: Информационно-аналитический журнал. – 2008 г. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://www.fishnews.ru/news/5001>
12. Шевченко В. В. Товароведение и экспертиза качества рыбы и рыбных товаров. СПб.: Питер, 2005. 256 с.

УДК 630*237.2:630*228.7:630*237.4

ВАСИЛИЙ АЛЕКСЕЕВИЧ МАТЮШКИНмладший 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

ВЛИЯНИЕ ВНЕСЕНИЯ МИНЕРАЛЬНЫХ УДОБРЕНИЙ НА ПРОДУКТИВНОСТЬ И НАКОПЛЕНИЕ ФИТОМАССЫ КУЛЬТУР СОСНЫ НА ОСУШЕННОМ ПЕРЕХОДНОМ БОЛОТЕ

После внесения минеральных удобрений продуктивность культур сосны на осушенном переходном болоте за 16 лет наблюдений увеличилась на 29 %. Через 16 лет после подкормки приросты в высоту и по диаметру на опыте значительно больше, чем на контроле. Годичный прирост фитомассы в культурах сосны в возрасте 31 года в 2,5–3,5 раза больше, чем на неосушенном болоте.

Ключевые слова: осушение, торфяная залежь, лесные культуры, удобрения, продуктивность, фитомасса, углерод, опад, отпад

В настоящее время огромное внимание уделяется проблемам, связанным с глобальным изменением климата и ролью в нем углекислого газа. В связи с усиливающимся антропогенным воздействием на атмосферу все большее значение приобретает правильная оценка биосферной роли гидролесомелиорации.

При оценке запаса углерода в лесных экосистемах и его динамики наиболее часто используется биологическая продуктивность. Количественная характеристика параметров круговорота углерода в лесных экосистемах необходима для оценки их роли в глобальном углеродном цикле, что особенно актуально в связи с проблемами сохранения биопродуктивности и биосферной функции лесов.

Для целей лесного хозяйства в Карелии было осушено более 600 тыс. га, из которых 230 тыс. га составили безлесные и слабооблесенные болота. К лесокультурному фонду отнесено более 100 тыс. га, из них на 70 тыс. га были созданы лесные культуры, в основном сосны.

Целью исследований было выявление динамики роста, продуктивности и накопления фитомассы в лесных культурах сосны, созданных на осушенном переходном болоте, после внесения минеральных удобрений. Также одной из задач опыта была оценка влияния проводимых мероприятий на биосферные процессы в сравнении с неосушенной болотной экосистемой.

ОБЪЕКТЫ И МЕТОДИКА

Исследования выполнялись на Киндасовском стационаре (61°50' с. ш., 33°30' в. д., среднетаежная подзона Карелии). Болотный массив об-

щей площадью около 70 га осушен в 1969 году с расстоянием между осушителями 160 м. Почва торфяная переходная, до глубины 20 см сложена сфагновыми слабо разложившимися торфами, зольность которых – 2–4 %, кислотность pH_{KCl} – 2,6–2,9; глубже – хорошо разложившимися осоково-торфяными торфами с зольностью 5,5–7,0 % и кислотностью 3,3. Почва подготовлена путем бороздования, расстояние между бороздами – 5–6 м, глубина – 40–50 см. При нарезке борозд верхний слой почвы запахивался вглубь, а на поверхность извлекались более плотные и зольные слои. Пласты прикатывались гусеницами, таким образом, их плотность и зольность оказались несколько выше, чем междурядий. Пробные площади заложены в 16-летних культурах сосны обыкновенной на одной междуканавной полосе. Между удобренным участком и контролем оставлена буферная зона шириной 20 м. Минеральные удобрения ($N_{75}P_{125}K_{75}$ по действующему веществу) внесены в июне вручную на поверхность почвы. В качестве удобрений использованы: карбамид, двойной суперфосфат и хлористый калий. Культуры сосны имели высоту 5 м, густоту 3,2 тыс. шт. га⁻¹ и запас 32 м³ га⁻¹.

Травяно-кустарничковый покров на момент внесения минеральных удобрений был хорошо развит. После осушения обильно разрослась карликовая береза (Сор3), встречались клюква четырехлепестная (Сор1), пушица влагалищная (Сор1), кассандра (Сор1); степень проективного покрытия составляла 90 %. Сфагновые мхи занимали почти всю поверхность междурядий, степень проективного покрытия – 80 %, лишь на пластах в небольшом количестве росли мох

Плеурозий Шребери и политрихум обыкновенный (5 %).

Таксационные работы проводились до внесения удобрений и через 5, 9 и 16 лет после подкормки. Для определения фитомассы древесного яруса каждый раз отбирались модельные деревья среднего диаметра в количестве 10 штук на каждом варианте. Всего было отобрано 80 деревьев. Сбор и обработка полевых материалов выполнялись по методике, разработанной в Институте леса и древесины им. В. Н. Сукачева СО АН СССР [9]. Продуктивность напочвенного покрова определялась в июле методом укусов на площадках (0,25 м²), их число составляло 40 штук в каждом варианте. Одновременно отбирали образцы всех фракций древостоя и видов напочвенной растительности на содержание в них углерода. Определение содержания углерода в образцах выполнено в аналитической лаборатории Института леса КарНЦ РАН спектрофотометрическим методом мокрого сжигания по Тюрину с использованием спектрофотометра КФК – 2МП.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

При внесении комплексных минеральных удобрений создается благоприятный пищевой режим для роста растений. За счет более активной трансформации органического вещества повышается зольность верхнего слоя почвы. Внесение минеральных удобрений прежде всего оказало большое влияние на изменение ассимиляционного аппарата сосны, что выразилось в увеличении длины хвои и сухого веса 100 пар хвоинок. Указанные параметры особенно возросли по сравнению с контролем на второй год после внесения удобрений, хотя впоследствии эта разница несколько сократилась, но оставалась статистически достоверной на протяжении 5 лет.

Улучшение пищевого режима при внесении минеральных удобрений не только способствует изменению ассимиляционного аппарата, но и обуславливает улучшение роста древесных растений. Прирост сосны в высоту после проведения подкормки постепенно увеличивается по сравнению с приростом сосны контрольного насаждения. В первое пятилетие после подкормки прирост в высоту у сосны возрастает на 16 %, во второе – на 26 %, в третье – на 37 %. За весь период наблюдений (16 лет) прирост сосны в высоту на удобренном варианте был выше на 25,1 % (рис. 1). Такая же тенденция наблюдается и при сравнении приростов по диаметру на удобренном и контрольном вариантах. В первое пятилетие прирост на удобренном варианте возрастает на 14 %, во втором – на 38 %, в третьем – на 51 %, за период наблюдений в среднем на 30 % (рис. 2). Срок последствия внесения минеральных удобрений в этих условиях продолжается, приросты сосны в высоту и по диаметру на удобренном варианте и через 16 лет больше,

чем на контроле. Это совпадает с данными ранее проведенных исследований по влиянию внесения минеральных удобрений в сосняке травяно-сфагновом [7].

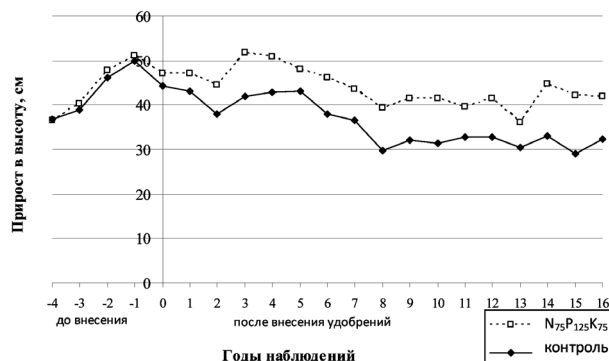


Рис. 1. Прирост культур сосны в высоту по вариантам опыта

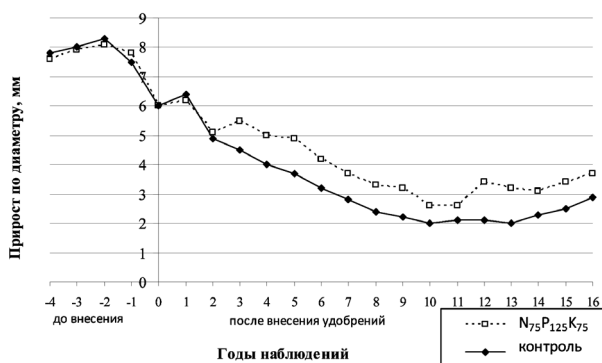


Рис. 2. Прирост культур сосны по диаметру по вариантам опыта

По данным ряда авторов, полученных при исследовании эффекта от внесения полных минеральных удобрений на бедных верховых торфяных почвах, срок влияния подкормки на рост деревьев продолжается 7–10 лет [2], [5], [6].

Увеличение срока последствия подкормки на переходных и низинных торфах объясняется тем, что хорошо развитый напочвенный покров, где преобладает карликовая береза, обладая мощной корневой системой, перехватывает основную массу внесенных питательных веществ и закрепляет их в корнях и стволиках. Содержание элементов питания возрастает во всех фракциях напочвенного покрова [8].

Фитомасса напочвенного покрова в течение двух-трех лет после подкормки резко возрастает. Исследованиями установлено, что активность поглощения элементов питания единицей поверхности корней травяно-кустарничкового яруса в десятки раз выше, чем древесных [11]. Травянистая растительность благодаря активной поглотительной и выделительной деятельности корневых систем значительно обогащает почву подвижными элементами питания. Растения выделяют в окружающую среду до 70–90 % от общего количества поглощенных веществ. Увеличение приростов в высоту и по диаметру сосны

на удобренном варианте оказывает большое влияние на увеличение сомкнутости древесного полога, что приводит к ухудшению освещенности нижних ярусов фитоценоза; наблюдается резкое отмирание травяно-кустарничкового и мохового ярусов. При разложении опада напочвенного покрова происходит обогащение верхнего слоя почвы, увеличивается количество доступных для корневых систем элементов питания. Ранее проведенными исследованиями [4] установлено, что внесение минеральных удобрений на торфяных почвах приводит к увеличению численности и активности большей части микробной биоты. Активизация микрофлоры усиливает процессы накопления аммиачного азота и разрушения целлюлозы, соответственно, белки и углеводы растительных остатков минерализуются быстрее, высвобождающиеся элементы минерального питания включаются в биологический круговорот веществ, восполняя недостаток элементов питания в доступной для растений форме. Различия в составе и численности микрофлоры со временем увеличиваются.

Улучшение почвенного питания оказывает большое влияние на процессы роста культур сосны и повышение продуктивности насаждения, это хорошо прослеживается по изменению таксационных показателей с увеличением их возраста (табл. 1). Древостой на варианте внесения минеральных удобрений в настоящее время растет по I,5 классу бонитета, тогда как на контроле класс бонитета II,1. За 16 после подкормки получен дополнительный прирост $36 \text{ м}^3 \text{ га}^{-1}$.

Таблица 1

Изменение таксационных показателей культур сосны на осушенном переходном болоте с увеличением их возраста по вариантам опыта

Возраст, лет	Породный состав	Средние		Густота, шт. га ⁻¹	Полнота		Запас, м³/га ⁻¹		Класс бонитета
		высота, м	диаметр, см		абсолютная, м² га ⁻¹	относительная	растущей	сухой	
Контроль (неудобренные культуры сосны)									
16*	10С	5,1	6,1	3240	9,4	0,61	32	1	II,0
20	10С	6,8	7,5	3080	13,9	0,70	52	2	II,0
24	10С	8,2	8,6	2990	17,6	0,74	72	3	II,0
31	10С	10,3	10,4	2790	23,6	0,87	126	7	II,1
Удобренные культуры сосны									
16*	10С	5,1	6,1	3190	9,3	0,61	32	1	II,0
20	10С	7,4	8,5	2970	16,9	0,82	71	6	I,9
24	10С	8,9	10,1	2770	22,2	0,89	103	16	I,8
31	10С	11,7	12,3	2350	28,0	0,96	162	70	I,5

Примечание. * – учеты сделаны до начала роста сосны.

Улучшение условий роста приводит к усилению дифференциации и увеличению отпада. Процесс изреживания насаждения на удобренном варианте идет значительно интенсивнее, чем в контрольном. За последние семь лет густота сосны уменьшилась соответственно на 420 и 220 шт. га⁻¹.

В отпад идет в основном сосна низших ступеней толщины, отставшая в росте и находящаяся под кроной более крупных деревьев. Стволы на удобренном варианте имеют хорошо развитую, густо охвоенную крону и лучшую очищаемость ствола от сучьев.

Наиболее полное представление об изменении роста и продуктивности насаждений под влиянием внесения полного минерального удобрения дает динамика накопления фитомассы. С увеличением возраста культур сосны во фракционном составе надземной фитомассы возрастает доля стволовой древесины и снижается доля хвои, что характерно как для опытного, так и для контрольного вариантов. Общая фитомасса древесного яруса заметно увеличивается, в контрольном варианте ее прирост за 16 лет составил 569 (196 %), а в опытном – 801 (267 %) ц га⁻¹ абсолютно сухого вещества (а. с. в.) (табл. 2). Фитомасса напочвенного покрова на опытном варианте значительно уменьшилась за счет отмирания сфагновых мхов и карликовой березы. Масса сфагновых мхов сократилась в 3,0 раза, березы карликовой – в 57,2 раза. Но если учесть, что уменьшение фитомассы березы карликовой и мхов происходит как на контрольном варианте, так и на опытном (на последнем более интенсивно), то можно считать, что это связано не только с влиянием удобрений, но и с ухудшением освещенности за счет увеличения сомкнутости верхнего полога. Масса сфагновых мхов на контроле уменьшилась в 1,5 раза, а березы карликовой – в 9,4 раза.

Годичный прирост фитомассы с увеличением возраста (с 16 лет до 31 года) лесных культур возрастает на контроле в 1,5 раза, на удобренном варианте – в 1,8 раза, при этом в фитомассе закрепляется соответственно 44,1 и 49,2 ц га⁻¹, что в пересчете на углерод составляет 21,0 и 23,1 ц га⁻¹. В то же время масса опада и отпада, поступающая на поверхность почвы, составляет 74,6 ц га⁻¹ в контрольном варианте и 97,5 ц га⁻¹ – на удобренном, в пересчете на углерод соответственно 34,7 и 45,5 ц га⁻¹.

В большинстве исследований содержание углерода в различных фракциях фитомассы принято за 45 % массы абсолютно сухого вещества в зеленых частях растений и 50 % – в стволах, корнях и ветвях. Наши данные по содержанию углерода в различных фракциях несколько меньше (табл. 3) и близки к данным К. С. Бобковой и В. В. Тужилкиной [1] для лесов Севера.

В связи с усиливающимся антропогенным воздействием на атмосферу все большее значение приобретает правильная оценка биосферной роли гидроресомелиорации. Наибольшие споры вызывает вопрос целесообразности осушения открытых болот, являющихся местом стока углерода из атмосферы и его долговременного хранения.

Таблица 2

Изменение фитомассы, годовичного прироста, опада и отпада культур сосны
на осушенном переходном болоте с увеличением их возраста
по вариантам опыта, в ц га⁻¹ а. с. в.

Фракции	15 лет			20 лет			24 года			31 год		
	Фито-масса	Годичный прирост	Опад и отпад	Фито-масса	Годичный прирост	Опад и отпад	Фито-масса	Годичный прирост	Опад и отпад	Фито-масса	Годичный прирост	Опад и отпад
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
Контроль (неудобренные культуры сосны)												
Стволы	145,0	16,6	0,3	226,8	24,0	5,2	326,8	34,3	10,8	574,0	66,2	29,6
Крона	105,0	26,3	20,3	124,0	32,4	28,9	139,8	33,4	30,1	143,2	31,5	29,8
в т. ч. хвоя	53,6	22,3	19,4	65,7	28,7	27,6	66,0	29,6	28,6	66,4	27,6	28,2
сучья	51,4	4,0	0,9	68,3	3,7	1,3	73,8	3,8	1,5	76,8	3,9	1,6
Мертвая часть	4,2			18,4			33,0			61,2		
в т. ч. стволы	0,5			1,8			2,3			6,3		
Древостой	257,8	42,9	20,6	377,4	56,4	34,1	497,2	67,7	40,9	789,2	97,7	59,4
Кустарнички	30,2	7,6	10,8	6,6	1,6	1,7	5,7	1,4	1,6	3,2	0,8	0,9
Травы	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8	0,6	0,6	0,6	0,5	0,5	0,5
Мхи	18,7	6,2	4,1	22,2	4,5	5,6	18,0	3,6	4,2	12,7	2,5	2,8
Напочвенный покров	49,7	14,6	15,7	29,6	6,9	7,5	24,3	5,6	6,4	16,4	3,0	3,2
Надземная часть	307,5	57,5	36,3	407,0	63,3	47,7	521,5	73,3	47,3	805,6	100,7	62,6
Корни деревьев	37,0	4,2	0,1	57,8	6,1	1,3	78,4	8,2	2,6	132,0	15,2	6,8
Корни кустарничков	126,8	16,7	23,8	27,7	3,5	3,7	23,9	3,1	3,5	7,0	1,8	4,2
Корни трав	4,0	1,6	1,6	4,0	1,6	1,6	3,0	1,2	1,2	2,5	1,0	1,0
Подземная часть	167,8	22,5	25,5	89,5	11,2	6,6	105,3	12,5	7,3	141,5	18,0	12,0
ВСЕГО	475,6	80,0	61,8	496,5	74,5	48,8	626,8	85,8	54,6	947,1	118,7	74,6
Содержание углерода	215,9	36,3	27,2	231,5	34,7	23,0	295,2	39,9	25,2	445,2	55,7	34,7
Удобренные культуры сосны												
Стволы	146,8	16,6	0,3	320,8	43,3	10,8	493,5	66,4	28,8	761,4	81,0	44,4
Крона	107,7	27,2	21,0	138,0	35,7	31,1	158,3	37,8	33,4	184,6	38,6	34,3
в т. ч. хвоя	55,5	23,3	20,1	65,4	29,6	27,9	70,1	30,8	29,2	79,1	32,2	30,7
сучья	52,2	3,9	0,9	72,6	6,1	3,2	88,2	7,0	4,2	85,5	6,4	3,6
Мертвая часть	5,1			33,2			66,5			127,0		
в т. ч. стволы	0,9			26,8			15,9			70,5		
Древостой	262,9	43,8	21,3	492,0	60,0	41,9	706,9	104,2	62,2	1053,0	119,6	78,7
Кустарнички	28,6	8,6	7,3	34,9	7,0	10,3	0,6	0,2	0,2	0,5	0,1	0,1
Травы	0,6	0,6	0,6	8,5	8,5	8,5	1,8	1,8	1,8	2,1	2,1	2,1
Мхи	22,8	4,6	6,8	12,4	2,5	3,4	8,1	1,6	1,7	7,5	1,5	1,6
Напочвенный покров	52,0	13,8	14,7	55,8	18,0	22,2	10,5	3,6	3,7	10,1	3,7	3,8
Надземная часть	315,7	57,6	36,0	547,8	78,0	64,1	717,4	107,8	65,9	1063,1	123,3	82,5
Корни деревьев	37,4	4,2	0,1	81,8	11,0	2,8	118,3	15,9	6,9	175,0	18,6	10,2
Корни кустарничков	120,1	18,9	16,1	146,6	15,2	22,7	2,5	0,4	0,4	2,2	0,2	0,2
Корни трав	3,0	1,3	1,3	40,2	18,7	18,7	7,6	4,0	4,0	8,8	4,6	4,6
Подземная часть	160,5	24,4	17,5	268,6	44,9	44,2	128,2	20,3	11,3	186,0	23,4	15,0
ВСЕГО	466,2	82,0	53,5	816,4	122,9	108,3	845,6	128,1	77,2	1246,1	146,7	97,5
Содержание углерода	211,8	37,6	23,8	373,6	55,5	48,2	397,4	60,1	35,9	586,0	68,6	41,5

Таблица 3
Содержание углерода в различных
фракциях древостой и видах растений
и мхов напочвенного покрова

Содержание углерода в % а. с. в.			
Древостой		Напочвенный покров	
Фракции	«С», %	Виды	«С», %
Древесина ствола сосны	47,0	Хамедафне обыкновенная	42,6
Кора ствола сосны	48,9	Подбел многолистный	43,0
Древесина сучьев сосны	47,1	Карликовая береза	39,4
Кора сучьев сосны	46,3	Клюква четырехлепестная	42,0
Годичные побеги сосны	46,1	Пушица влагалищная	41,6
Мертвые сучья в коре	46,2	Щитовник остистый	45,5
Хвоя сосны 1-го года	45,8	Сфагнум	44,6
Хвоя сосны 2–3-го года	47,8	Политрих обыкновенный	42,3
Корни сосны тонкие	46,4	Плеурозий Шребере	42,8
Корни сосны толстые	49,0	Аулакомний болотный	42,3

Биологическая продуктивность неосушенных болот – постоянная величина, лишь изредка наблюдаются колебания, связанные с метеорологическими условиями конкретного года. Годичная продукция мезотрофных открытых болот Карелии, за счет которой идет пополнение запасов органического вещества в торфе, составляет 37,6–59,5 ц га⁻¹ [3]. Годичный прирост фитомассы в лесных культурах сосны в возрасте 31 года на осушенном переходном болоте значительно выше, чем на контроле, – 118,7, на удобренном варианте – 146,7 ц га⁻¹.

Таким образом, создание на осушенном переходном болоте высокопродуктивных культур сосны через 20–25 лет способствует увеличению стока углерода из атмосферы по сравнению с неосушенным болотом. Годичный прирост фитомассы культур сосны в возрасте 31 года значительно (в удобренном варианте – в 2,5–4 раза, в контрольном – в 2–3 раза) превышает прирост фитомассы открытого неосушенного болота.

ВЫВОДЫ

Улучшение минерального питания способствует формированию развитого фотосинтетического аппарата, что в конечном итоге приводит к увеличению прироста сосны по высоте, диаметру и запасу. За 16 лет после внесения минеральных удобрений получен дополнительный прирост по запасу в размере 36 м³ га⁻¹. С увеличением срока давности проведения осушения и подкормки меняется фракционный состав фитоценоза, возрастает роль древесного полога, уменьшается напочвенный покров. Общая фитомасса на удобренном варианте значительно больше, чем в контроле, соответственно 1246,1 и 947,1 ц га⁻¹. Годичный прирост фитомассы в культурах сосны в возрасте 31 года в 2,5–3,5 раза больше, чем на неосушенном болоте, что особенно значимо в связи с усиливающимся антропогенным воздействием на атмосферу. Последствие внесения минеральных удобрений в лесные культуры сосны на осушенном переходном болоте продолжается и через 16 лет, приросты в высоту и по диаметру на опытном варианте больше, чем на контрольном.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бобкова К. С., Тужилкина В. В. Содержание углерода и калорийность органического вещества в лесных экосистемах Севера // Экология. 1991. № 3. С. 3–10.
2. Валк У. А. Опыт по удобрению насаждений в Эстонской ССР // Применение минеральных удобрений в лесном хозяйстве: Тез. докл. Всесоюз. совещ. Архангельск: Архангельский институт леса и лесохимии, 1986. С. 5–6.
3. Елина Г. А., Кузнецов О. Л., Максимов А. И. Структурно-функциональная организация и динамика болотных экосистем Карелии. Л.: Наука, 1984. 128 с.
4. Загуральская Л. М., Клейн Л. А. Изменение микробиологических процессов в торфяной почве переходного типа под влиянием рубок // Научные основы повышения эффективности использования болот Карелии. Петрозаводск: КФ АН ССР, 1982. С. 29–35.
5. Ипатьев В. А., Блинцов И. К. Некоторые вопросы удобрения осушенных лесов БССР // Применение минеральных удобрений в лесном хозяйстве: Тез. докл. Всесоюз. совещ. Тарту, 1977. С. 74–78.
6. Матюшкин В. А. Внесение минеральных удобрений и формирование сосняка кустарничково-сфагнового на бедной верховой торфяной почве // Лесоводственно-экологические аспекты хозяйственной деятельности в лесах Карелии. Петрозаводск: КНЦ РАН, 2005. С. 8–18.
7. Матюшкин В. А., Скороходова О. Н. Изменение процессов формирования и продуктивности сосняка травяно-сфагнового на торфяной почве под воздействием проведения лесохозяйственных мероприятий // Лесоводственно-экологические аспекты хозяйственной деятельности в лесах Карелии. Петрозаводск: КНЦ РАН, 2005. С. 19–33.
8. Медведева В. М., Морозова Р. М., Матюшкин В. А., Корчагина М. П. Минеральное питание и рост сосны в культурах на осушенном переходном болоте при внесении удобрений // Лесоведение. 1994. № 2. С. 3–12.
9. Поздняков Л. К., Протопопов В. В., Горбатенко В. М. Биологическая продуктивность лесов средней Сибири и Якутии. Красноярск, 1969. 155 с.
10. Саковец В. И., Германова Н. И., Матюшкин В. А. Экологические аспекты гидроресомелиорации в Карелии. Петрозаводск: КНЦ РАН, 2000. 155 с.
11. Якушев Б. И. О механизме поглощения растениями элементов минеральной пищи из почвы // Эколого-физиологические основы взаимодействия растений в фитоценозах. Минск: Наука и техника, 1976. С. 117–123.

ГЕОРГИЙ АЛЕКСАНДРОВИЧ БОРИСОВ

кандидат технических наук, доцент кафедры энергообеспечения предприятий и энергосбережения физико-технического факультета, Петрозаводский государственный университет
borisov@krc.karelia.ru

ВАЛЕРИЙ ДМИТРИЕВИЧ КУКИН

научный сотрудник Института прикладных математических исследований, Карельский научный центр РАН
kukin_v@krc.karelia.ru

ЭВОЛЮЦИОННЫЙ АЛГОРИТМ ОПТИМИЗАЦИИ РАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНОЙ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ СЕТИ

В статье для оптимизации распределительных электрических сетей предлагается использовать эволюционный алгоритм решения потоковой задачи Штейнера.

Ключевые слова: эволюционный алгоритм, потоковая задача Штейнера, распределительные электрические сети

В электросетевом хозяйстве страны насчитывается 2,5 млн км высоковольтных линий электропередачи. Из них 1,5 млн км составляют воздушные линии распределительных сетей напряжением 6 и 10 кВ, на которые приходится около 70 % нарушений электроснабжения потребителей [6]. При проектировании таких сетей необходимо учитывать следующие особенности:

1. Большинство сетей имеет древовидную конфигурацию, образованную радиальными и магистральными линиями электропередачи, сходящимися в распределительных пунктах и трансформаторных подстанциях.

2. На местности нет участков, на которых запрещено строительство воздушных линий электропередачи.

3. Согласно «Правилам устройства электроустановок», при передаче от источника потребителям не допускается падение напряжения ниже предельно допустимого уровня от номинального напряжения. Обычно это ограничение проверяется у удаленных потребителей [9].

4. Привязка элементов сети к условиям местности: неоднородность местности влияет на величину необходимых капитальных вложений.

Для оптимизации проектирования таких сетей можно применять модель потоковой задачи Штейнера (она инвариантна относительно направления потоков). Эта задача – одно из обобщений классической задачи Штейнера [1], которая относится к классу NP -трудных [2]. Для их решения широко используют приближенные методы, в частности эволюционные. Данная статья обосновывает применение потоковой задачи Штейнера к распределительным электрическим сетям и представляет эволюционный алгоритм (ЭА) для ее решения.

Модель потоковой задачи Штейнера. При проектировании распределительной электрической сети известно расположение фиксированных точек: источника (понижительной подстанции) и потребителей с расчетными мощностями. Тре-

буется связать их сетью линий электропередачи с минимальными затратами на ее строительство и эксплуатацию. Для минимизации можно вводить дополнительные свободно размещаемые точки – распределительные узлы.

Математическая модель потоковой задачи Штейнера представляет схему искомой сети в виде ориентированного корневого дерева. Терминальные вершины дерева отождествляются с фиксированными точками (корень – с источником), а точки Штейнера (ТШ) – с распределительными узлами. С дугами дерева сопоставляются линии электропередачи. На дугах задается весовая функция, зависящая от величин потоков на них. Весом дуги называют значение весовой функции, отнесенное к единице длины дуги, а ее взвешенной длиной – произведение веса на длину дуги в евклидовой метрике. В общем случае весовая функция может быть произвольного вида, но должна быть неубывающей. Ищется сеть с минимальной суммой взвешенных длин дуг.

Дерево описывают топология (порядок соединения вершин) и координаты ТШ. Локально оптимальным решением задачи является дерево Штейнера (ДШ) – дерево с оптимальными координатами ТШ для заданной топологии; глобально оптимальным – минимальное ДШ среди всех топологий (МДШ) [1]. Размерность задачи $n > 3$ определяется числом терминальных вершин дерева. Не нарушая общности подхода, можно рассматривать только деревья с полными топологиями [1], то есть с максимальным числом ТШ, равным $n - 2$. При оптимизации координат ТШ могут появиться вырожденные дуги (нулевой длины).

Основные допущения модели потоковой задачи – древовидная конфигурация сети и произвольное расположение распределительных узлов (ТШ). Это позволяет применять модель к нашему объекту исследования при условии однородности местности.

Чтобы контролировать падение напряжения у удаленных потребителей, необходимо ввести в модель ограничения:

$$\Delta U_d \leq \Delta U, \quad d = 1 + k, \quad k < n, \quad (1)$$

где ΔU_d – падение напряжения у потребителя d ; k – число потребителей; ΔU – предельно допустимый уровень падения напряжения.

Целевая функция. Методические рекомендации по оценке эффективности инвестиционных проектов [8] предлагают минимизировать суммарные дисконтированные затраты на строительство и эксплуатацию технического объекта. В распределительной сети такие затраты включают одновременные капитальные вложения и дисконтированные эксплуатационные затраты в виде стоимости потерь электроэнергии [9]. Соответствующая целевая функция имеет вид:

$$C = \sum_{i=1}^n \left(K(s_i) + \frac{\tau \cdot t_n}{E} \cdot \frac{\rho}{10^3 \cdot U_n^2} \cdot \frac{S_i^2}{s_i} \right) \cdot l_i, \quad (2)$$

где $K(s_i)$ – удельные капитальные вложения, зависящие от сечения провода s_i на дуге i (тыс. руб./км); τ – тариф на электроэнергию (руб./кВт · ч); t_n – время наибольших потерь мощности (час/год); E – коэффициент дисконтирования; ρ – удельное сопротивление алюминиевого провода (ом · мм²/км); U_n – номинальное напряжение (кВ); S_i – полная мощность на дуге i (кВА); s_i – сечение алюминиевого провода на дуге i (мм²); l_i – длина дуги i (км).

В формуле (2) выражение в скобках перед l_i – вес дуги i . Весовая функция – квадратичная с разрывами функции от потоков.

Эволюционный алгоритм. Ранее потоковая задача Штейнера использовалась нами для оптимизации транспортных сетей. Были разработаны эволюционная модель [4], генетические операторы [5], композитный алгоритм с направленным поиском [4]. Вычислительный эксперимент, проведенный на тестовых задачах разной размерности, подтвердил эффективность работы алгоритма. Он находит МДШ или хорошие ДШ за конечное число итераций и приемлемое время [3]. Порядок сложности одной итерации – $O(n^3 \log n)$.

На основе этой оригинальной разработки построен эволюционный алгоритм, адаптированный для оптимизации распределительной сети. Он формирует группу альтернативных решений, которые представляют топологию, оптимальные координаты ТШ и набор сечений проводов. Блок-схема алгоритма дана на рис. 1.

Для описания алгоритма далее используются известные биологические термины и аналогии. Решение интерпретируется как особь, а его свойства – как фенотип особи. Если справедливы ограничения (1), фенотип особи считается корректным. Мы ограничимся кратким комментарием к компонентам алгоритма, рассмотрен-

ным в [4], [5], и подробно остановимся на новом компоненте – блоке адаптации.

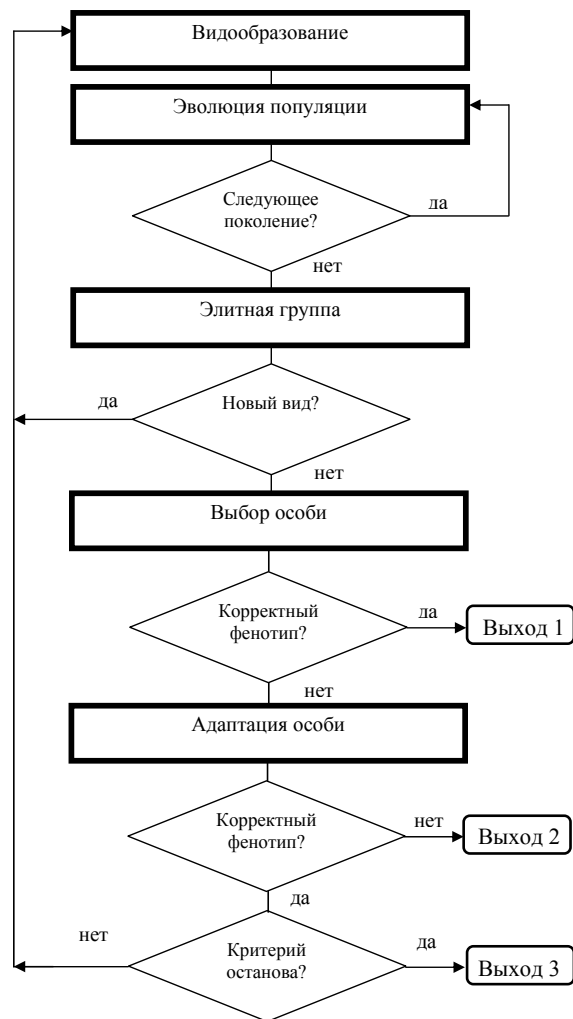


Рис. 1. Обобщенная блок-схема эволюционного алгоритма

Процесс эволюции имитируется на двух взаимосвязанных временных уровнях с помощью генетических операторов. На верхнем уровне происходит случайное образование новых видов особей. Оно начинается со специального предкового вида [5]. На нижнем уровне моделируется эволюция популяции отдельного вида: последовательно генерируются пары популяций – мутантов и гибридных особей [4]. За счет лучших по целевой функции особей создается и обновляется элитная группа. Из нее после завершения поиска выбирается решение.

Если особь имеет корректный фенотип, алгоритм завершается [Выход 1]. Иначе активизируется блок адаптации: ищется особь с корректным фенотипом. Если такой нет, происходит аварийное завершение [Выход 2]. (В этом случае необходим анализ входных данных.)

При работе алгоритма критерий останова может быть отключен. Если он включен, алгоритм ищет ДШ для топологии, полученной до активи-

зации блока адаптации, и завершает работу локально оптимальным решением [Выход 3]. (Это традиционно принятый подход.) Если критерий останова отключен, поиск МДШ продолжается для откорректированной плотности тока. Это позволяет учесть ее влияние на выбор конфигурации сети.

Блок адаптации. Сечения проводов на дугах сети определяют падения напряжения на них. Назначение блока – найти для сети такой набор сечений, при котором справедливы ограничения (1). Падение напряжения у удаленного потребителя рассчитывается как сумма падений напряжения на дугах пути к нему из источника. (Такой подход корректен, так как при расчете полной мощности предполагается равенство коэффициентов мощности на дугах.) Другой набор сечений определяется процедурой корректировки экономической плотности тока j . Технологические ограничения на плотность тока и на множество допустимых сечений гарантируют конечность процедуры.

Блок адаптации реализован в виде цикла по $d = 1 \div k$ удаленным потребителям. Одна итерация цикла включает следующие шаги.

1. У потребителя d вычисляется падение напряжения по формуле:

$$\Delta U_d = \sum_{i=1}^d \frac{P_i \cdot R_i + Q_i \cdot x_0(s_i) \cdot l_i}{10^3 U_n}, \quad (3)$$

где $P_i = S_i \cdot \cos \varphi$ – активная мощность на дуге i (кВт); S_i – полная мощность на дуге i (кВА), φ – угол сдвига между векторами тока и напряжения; R_i – активное сопротивление на дуге i (ом); $Q_i = S_i \cdot \sin \varphi$ – реактивная мощность на дуге i (кВАр); $x_0(s_i)$ – удельное индуктивное сопротивление для сечения s_i (ом/км); l_i – длина дуги i .

R_i находится по формуле:

$$R_i = \frac{\rho \cdot l_i}{s_i}, \quad (4)$$

где ρ – удельное сопротивление алюминиевого провода (ом · мм²/км); s_i – площадь поперечного сечения провода на дуге i (мм²).

2. Если для потребителя d ограничение (1) справедливо, процесс завершается, иначе осуществляется переход к шагу 3.

3. Плотность тока j снижается с заданным шагом $\Delta j \in [0,01; 0,05]$. Для каждой дуги i значение сечения s_i вычисленное по формуле (5), заменяется ближайшим целым из заданного множества:

$$s_i = \frac{S_i}{\sqrt{3} \cdot U_n \cdot j}. \quad (5)$$

Корректировка j заканчивается, когда получен набор сечений, для которого ограничение (1) справедливо. Если для какой-то дуги не удастся подобрать подходящее сечение, происходит аварийное завершение.

Цикл, выполняемый блоком адаптации, имеет линейный порядок сложности от размерности задачи n . Обычно число итераций цикла, определяемое числом удаленных потребителей, невелико: $k < n$. Порядок сложности одной итерации – линейный: порядок шага 2 – $O(1)$, остальных шагов – $O(n)$. На шаге 1 в худшем случае, когда путь из источника к удаленному потребителю проходит через $n - 2$ точки Штейнера, необходимо вычислить $n - 3$ слагаемых суммы (3). На шаге 3 выполняется конечное число корректировок плотности тока и после каждой определяются сечения на $2n - 3$ дугах [5]. Таким образом, добавление блока адаптации не меняет порядок сложности эволюционной составляющей рассмотренного алгоритма, унаследованной от композитного ЭА [4].

Пример. Работа ЭА демонстрируется на фрагменте реальной сети в Олонецком районе Республики Карелии. Это распределительная сеть напряжением 10 кВ (рис. 2), которая включает подстанцию (точка 1) и 9 потребителей (точки 2–10). Их координаты сняты с карты [10].

Данные для расчетов взяты из ситуационной схемы наружных сетей ОАО «Прионежская сетевая компания» по состоянию на 01.09.2009. Трансформатор понизительной подстанции может регулировать напряжение под нагрузкой в диапазоне $\pm 9\%$ от номинального напряжения. Предельно допустимый уровень падения напряжения $\Delta U = 2 \times 0,09 \cdot 10 = 1,8$ кВ, и для удаленного потребителя в точке 10 должно выполняться $\Delta U_{10} \leq 1,8$.

В таблице приведены основные характеристики решений для двух значений плотности тока j . Все обозначения во второй строке таблицы относятся к дуге i . Здесь S_i – полная мощность (кВ); l_i – длина дуги (км); s_i – сечение провода (мм²); ΔU_i – падение напряжения (кВ); C_i – значение целевой функции (тыс. руб.).

Для расчетов выбрана максимальная экономическая плотность тока $j = 1,60$ А/мм², принятая в 1960-е годы по «Правилам устройства электроустановок». Характеристики соответствующего решения представлены в левой части таблицы. Так как ограничение $\Delta U_{10} \leq 1,8$ в нем нарушено, выполнена одна корректировка j с шагом 0,01. Характеристики решения задачи для $j = 1,59$ А/мм² показаны в правой части таблицы. Оба решения – МДШ, что проверено точным алгоритмом (полным перебором).

Значения целевых функций: $8038,97 = 5447,14 + 2591,83$ и $7656,98 = 5641,17 + 2015,82$ тыс. руб. соответственно. Первое слагаемое – суммарные капитальные вложения, второе – суммарная дисконтированная стоимость потерь энергии. Улучшение целевой функции произошло за счет существенного снижения стоимости потерь энергии.

Если бы критерий останова был включен, алгоритм завершился нахождением ДШ для топологии, полученной до вхождения в блок адаптации.

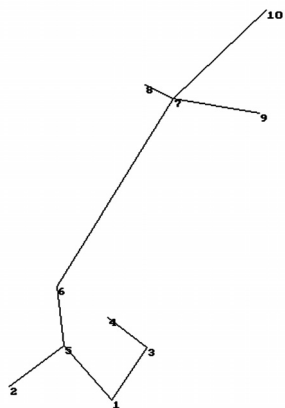


Рис. 2. Существующая распределительная сеть

Зависимость параметров ЛЭП
от сечения провода

i	$j = 1,60$					$j = 1,59$				
	S_i	l_i	s_i	ΔU_i	C_i	S_i	l_i	s_i	ΔU_i	C_i
2	160,00	3,74	16	0,44	531,31	160,00	3,86	16	0,45	548,53
3	400,00	1,67	16	0,37	343,87	400,00	0,00	16	0,28	0,13
4	160,00	0,00	16	0,41	0,10	160,00	1,25	16	0,37	177,86
5	250,00	0,52	16	0,34	82,22	250,00	0,00	16	0,33	0,64
6	100,00	2,64	16	0,57	355,91	100,00	2,75	16	0,39	370,63
7	100,00	0,00	16	1,49	0,16	100,00	0,00	16	1,11	0,10
8	100,00	1,79	16	1,53	241,05	100,00	1,79	16	1,15	240,93
9	160,00	1,31	16	1,68	185,58	160,00	0,74	16	1,21	105,49
10	193,00	5,45	16	1,85	805,34	193,00	5,69	16	1,40	839,60
11	180,00	1,61	16		233,45	762,40	3,00	35		774,40
12	369,00	2,60	16		506,29	317,70	2,67	16		474,24
13	522,40	1,61	25		343,79	369,00	0,82	16		159,99
14	442,40	10,57	16		2354,23	180,00	2,57	16		373,95
15	317,70	3,32	16		590,90	234,00	1,41	16		220,30
16	609,75	2,15	25		522,91	442,40	12,90	25		2453,77
17	909,75	1,24	35		385,12	536,00	3,00	25		653,53
18	1217,00	1,53	50		556,73	1217,25	0,72	50		262,88
Всего:		41,74			8038,97		43,17			7656,98

В этом случае для $j = 1,59$ А/мм² целевая функция составила бы $7679,95 = 5444,09 + 2235,86$ тыс. руб.

Найденные МДШ имеют разные вырожденные дуги, которые появились после оптимизации координат ТШ, и разную суммарную длину сети. Изменились сечения проводов на дугах 11, 13, 17. (Дуги, выходящие из терминальных вершин и из ТШ, имеют номера 2–10 и 11–18 соответственно.) Топологии оптимальных решений также не совпадают, как видно из рис. 3, где штриховой линией показана схема МДШ для $j = 1,60$, сплошной линией – для $j = 1,59$.

Общее время решения задачи, включая корректировку и 2 цикла поиска по 5 итераций, составило около 1 мин. на Intel Xeon 5430, 2,66 GHz. Точный алгоритм затратил около 65 мин. на поиск одного МДШ.

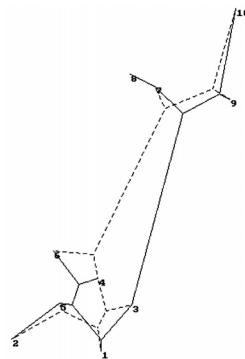


Рис. 3. Сравнение оптимальных топологий

Таким образом, рассмотрено применение модели потоковой задачи Штейнера к воздушным распределительным сетям напряжением 10 кВ. Для решения задачи предложен эволюционный алгоритм, который находит оптимальную конфигурацию сети и набор сечений проводов, удовлетворяющих ограничениям на падение напряжения у удаленных потребителей. Практическая значимость алгоритма показана на примере реальной сети. Алгоритм также можно применять для исследования параметров таких сетей. Дальнейшее развитие алгоритма предполагает учет условий неоднородности местности. Для этого необходима разработка цифровой модели местности.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гилберт Э. Н., Поллак Г. О. Минимальные деревья Штейнера // Кибернетический сборник, новая серия. Вып. 8. М.: Мир, 1971. С. 19–50.
2. Гэри М., Джонсон Д. Вычислительные машины и труднорешаемые задачи. М.: Мир, 1982. 416 с.
3. Кукин В. Д. О приложении методов эволюционного моделирования к потоковой задаче Штейнера // Методы математического моделирования и информационные технологии / Труды ИПМИ КарНЦ РАН. Вып. 8. Петрозаводск, 2007.
4. Кукин В. Д. Эволюционная модель для задачи Штейнера с потоками и зависящими от них весами // Известия РАН. Теория и системы управления. 2008. № 3. С. 115–123.
5. Кукин В. Д. Генетические операторы эволюционной модели для потоковой задачи Штейнера // Известия РАН. ТиСУ. 2010. № 2. С. 74–80.
6. Максимов Б. К., Воротницкий В. В. Оценка эффективности автоматического секционирования воздушных сетей 6–10 кВ с применением реклоузеров с целью повышения надежности электроснабжения потребителей // Электротехника. 2005. № 10. С. 7–22.
7. Методические рекомендации по оценке инвестиционных проектов / Рук. В. В. Коссов, В. И. Лившиц, А. Г. Шахназаров. М.: Экономика, 2000. 421 с.
8. Республика Карелия. Топографическая карта. СПб.: ФГУП «Аэрография», 2001.
9. Справочник по электроснабжению и электрооборудованию: В 2 т. / Под общ. ред. А. А. Федорова. Т. 2: Электрооборудование. М.: Энергоатомиздат, 1987.

ГЕННАДИЙ НИКОЛАЕВИЧ КОЛЕСНИКОВ

доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой механики, Петрозаводский государственный университет

kolesnikovgn@yandex.ru

ДМИТРИЙ АЛЕКСАНДРОВИЧ КУВШИНОВ

аспирант кафедры механики, Петрозаводский государственный университет

dak@ptz.ru

ДЕКОМПОЗИЦИЯ КОНЕЧНО-ЭЛЕМЕНТНОЙ МОДЕЛИ

Предлагается метод декомпозиции конечно-элементной модели механической системы. По физическому смыслу модель рассматривается как система конечных элементов, взаимодействующих в узлах. Анализ контактного взаимодействия в узлах элементов приводит к декомпозиции математической модели в виде системы линейных алгебраических уравнений.

Ключевые слова: метод декомпозиции, метод конечных элементов, контактное взаимодействие

Размерность задач, для решения которых применяется метод конечных элементов, имеет устойчивую тенденцию к росту. Увеличение быстродействия вычислительных систем решает только часть появляющихся в этой связи проблем. Приоритетным направлением в обеспечении эффективного использования возможностей вычислительной техники является развитие методов декомпозиции конечно-элементных алгоритмов. Обзоры работ в данной области исследований, актуальные проблемы и новые методы их решения представлены в [4], [7]. Для решения задач определенного класса может быть использован предлагаемый далее метод декомпозиции конечно-элементной модели.

Запишем в векторно-матричной форме уравнение движения конечно-элементной модели некоторой механической системы:

$$\mathbf{M}\ddot{\mathbf{U}} + \mathbf{K}\dot{\mathbf{U}} + \mathbf{R}\mathbf{U} = \mathbf{P} + \overline{\mathbf{C}}\overline{\mathbf{N}}. \quad (1)$$

Здесь $\mathbf{U}$, $\dot{\mathbf{U}}$ и $\ddot{\mathbf{U}}$ – векторы (одномерные массивы) перемещений, скоростей и ускорений узлов соответственно; $\mathbf{R}$, $\mathbf{K}$ и $\mathbf{M}$ – матрицы жесткости, демпфирования и масс соответственно; $\mathbf{P}$ – вектор внешних воздействий (внешних сил). В терминах метода перемещений строительной механики соотношение (1) можно интерпретировать как систему уравнений равновесия конечно-элементной модели [5; 10–15]. Уравнение (1) отличается от общепринятой формулировки [6] компонентом $\overline{\mathbf{C}}\overline{\mathbf{N}}$, где $\overline{\mathbf{C}}$ – матрица коэффициентов в уравнениях равновесия. Компонентами вектора $\overline{\mathbf{N}}$ являются силы и моменты (пары сил), появляющиеся в физической модели как результат контактного взаимодействия конечных элементов. Векторы $\overline{\mathbf{N}}$ и $\mathbf{U}$ заранее не известны и подлежат определению как результат решения задачи.

Результатом внешнего воздействия и указанного выше контактного взаимодействия являются, в частности, деформации конечных элемен-

тов, линейные и угловые перемещения в узлах. Эти перемещения ведут к появлению соответствующих зазоров, если в физической модели нет связей, которые не допускали бы изменений линейных и угловых расстояний между каждой парой узлов контактирующих конечных элементов. Текущие и начальные значения зазоров ($\overline{\mathbf{D}}$ и $\overline{\mathbf{D}}_0$ соответственно) связаны с перемещениями узлов $\mathbf{U}$ соотношением

$$\overline{\mathbf{D}} = \overline{\mathbf{C}}^T \mathbf{U} + \overline{\mathbf{D}}_0. \quad (2)$$

Из физического смысла контактного взаимодействия в узлах конечных элементов следует, что каждый столбец матрицы $\overline{\mathbf{C}}$ содержит только два ненулевых элемента, один из которых равен 1, другой – (-1). Заметим, что существует класс механических систем, в которых при некоторых воздействиях возможно появление зазоров, что рассмотрено, например, в [2], [3]. Далее рассматривается задача, по физическому смыслу которой зазоры равны нулю, то есть $\overline{\mathbf{D}} = \mathbf{0}$, $\overline{\mathbf{D}}_0 = \mathbf{0}$ в формуле (2).

Дискретизация уравнения движения (1) по времени с использованием явной схемы с односторонними конечными разностями приводит на шаге i с учетом равенства (2) к следующим соотношениям [2]:

$$\mathbf{A}\mathbf{U}_i = \hat{\mathbf{P}}_i + \overline{\mathbf{C}}\overline{\mathbf{N}}; \quad \mathbf{C}^T \mathbf{U}_i = \mathbf{0}, \quad (3)$$

где $\mathbf{A} = \mathbf{M}\tau^{-2} + \mathbf{K}\tau^{-1} + \mathbf{R}$, $\hat{\mathbf{P}}_i = \mathbf{P}_i + \tau^{-2}\mathbf{M}\mathbf{U}_{i-2} + (2\mathbf{M}\tau^{-2} + \mathbf{K}\tau^{-1})\mathbf{U}_{i-1}$, τ – шаг по времени, i – номер шага.

Пусть конечно-элементная модель разбита на n подструктур. Каждая подструктура содержит m конечных элементов, $m \geq 1$. Рассматривая независимо от других каждую подструктуру k , $k = 1, \dots, n$, сформируем по аналогии с (3) матрицы $\mathbf{A}_i^{(k)}$, $\overline{\mathbf{C}}_i^{(k)}$, вектор $\hat{\mathbf{P}}_i^{(k)}$. Не указывая индекс i , запишем соотношения вида (3) для подструктуры k . Получим:

$$\mathbf{A}^{(k)}\mathbf{U}^{(k)} = \hat{\mathbf{P}}^{(k)} + \overline{\mathbf{C}}^{T(k)}\overline{\mathbf{N}}; \quad \overline{\mathbf{C}}^{(k)}\mathbf{U}^{(k)} = \mathbf{0}.$$

Систему этих соотношений для всех $k = 1, \dots, n$ можно записать в виде одного блочного векторно-матричного равенства:

$$\begin{pmatrix} \mathbf{A}^{(1)} & \mathbf{0} & \dots & \mathbf{0} & -\bar{\mathbf{C}}^{(1)} \\ \mathbf{0} & \mathbf{A}^{(2)} & \dots & \mathbf{0} & -\bar{\mathbf{C}}^{(2)} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ \mathbf{0} & \mathbf{0} & \dots & \mathbf{A}^{(n)} & -\bar{\mathbf{C}}^{(n)} \\ \bar{\mathbf{C}}^{T(1)} & \bar{\mathbf{C}}^{T(2)} & \dots & \bar{\mathbf{C}}^{T(n)} & \mathbf{0} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \mathbf{U}^{(1)} \\ \mathbf{U}^{(2)} \\ \dots \\ \mathbf{U}^{(n)} \\ \bar{\mathbf{N}} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \bar{\mathbf{P}}^{(1)} \\ \bar{\mathbf{P}}^{(2)} \\ \dots \\ \bar{\mathbf{P}}^{(n)} \\ \mathbf{0} \end{pmatrix} \quad (4)$$

Из (4) следует:

$$\mathbf{U}^{(k)} = \mathbf{A}^{-1(k)} (\bar{\mathbf{P}}^{(k)} + \bar{\mathbf{C}}^{(k)} \bar{\mathbf{N}}). \quad (5)$$

Касаясь вопроса о существовании указанной в (5) обратной матрицы, отметим, что система с распределенными параметрами под действием движущейся сосредоточенной массы рассмотрена в статье [6], автором которой, в частности, доказано, что матрица коэффициентов при старших производных в уравнении вида (1) всегда обратима.

Используя (5) и учитывая, что, согласно (4),

$$\bar{\mathbf{C}}^T \mathbf{U} = \sum_{k=1}^n \bar{\mathbf{C}}^{T(k)} \mathbf{U}^{(k)} = \mathbf{0},$$

получим:

$$\sum_{k=1}^n \bar{\mathbf{C}}^{T(k)} \mathbf{A}^{-1(k)} (\bar{\mathbf{P}}^{(k)} + \bar{\mathbf{C}}^{(k)} \bar{\mathbf{N}}) = \mathbf{0}.$$

Отсюда находим:

$$\bar{\mathbf{N}} = - \left(\sum_{k=1}^n \bar{\mathbf{C}}^{T(k)} \mathbf{A}^{-1(k)} \bar{\mathbf{C}}^{(k)} \right)^{-1} \sum_{k=1}^n \bar{\mathbf{C}}^{T(k)} \mathbf{A}^{-1(k)} \bar{\mathbf{P}}^{(k)}. \quad (6)$$

Подставив (6) в (5), определим $\mathbf{U}^{(k)}$, $k = 1, \dots, n$. Таким образом, задача определения векторов $\bar{\mathbf{N}}$ и $\mathbf{U}$ решена.

Из физического смысла контактного взаимодействия конечных элементов (или подструктур) следует, что каждый столбец матрицы $\bar{\mathbf{C}}$ содержит только два ненулевых элемента, один из которых равен 1, другой – (-1). При этом каждый столбец блока $\bar{\mathbf{C}}^{(k)}$ содержит только один ненулевой элемент, равный +1 или -1. Поэтому матрица $\mathbf{H} = \sum_{k=1}^n (\bar{\mathbf{C}}^{T(k)} \mathbf{A}^{-1(k)} \bar{\mathbf{C}}^{(k)})$ является диагональной. Учет особенностей структуры блока $\bar{\mathbf{C}}^{(k)}$ ведет к существенному упрощению вычислений по формулам (6) и (5).

Применение представленного метода декомпозиции конечно-элементной модели в алгоритмах расчета позволяет уменьшить затраты времени и объем требуемой оперативной памяти, что особенно важно при итерационном решении нелинейных задач [1], [3]. Кроме того, создаются новые возможности для параллельных вычислений.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Колесников Г. Н., Кувшинов Д. А. Численное моделирование колебаний контактной подвески с учетом геометрической нелинейности // Информационные технологии моделирования и управления. 2008. № 1(44). С. 98–103.
2. Колесников Г. Н., Кувшинов Д. А. Численное моделирование полуконтактного механического взаимодействия токоприемника и контактной сети при высокой скорости электровоза // Ученые записки Петрозаводского государственного университета. Сер. «Естественные и технические науки». 2008. № 3(94). С. 83–88.
3. Колесников Г. Н., Кувшинов Д. А. Численное моделирование динамического взаимодействия токоприемников и контактной сети // Вестник научно-исследовательского института железнодорожного транспорта. 2012. № 1. С. 9–12.
4. Копысов С. П., Новиков А. К. Метод декомпозиции для параллельного адаптивного конечно-элементного алгоритма // Вестник Удмуртского университета. Математика. Механика. Компьютерные науки. 2010. № 3. С. 141–154.
5. Норри Д., де Фриз Ж. Введение в метод конечных элементов: Пер. с англ. М.: Мир, 1981. 304 с.
6. Пестерев А. В. К задаче о движущейся массе // Труды Института системного анализа РАН. 2005. Т. 14. С. 217–221.
7. Фиалко С. Ю. Прямые методы решения систем линейных уравнений в современных МКЭ-комплексах. М.: СКАД-СОФТ: Изд-во Ассоциации строительных вузов, 2000. 160 с.

АЛЕКСАНДР ЮРЬЕВИЧ КОСЕНКОВ

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

СИСТЕМЫ САМЦОВО-СЛЕГОВЫХ ПОКРЫТИЙ В ЖИЛИЩЕ КАРЕЛИИ И СОПРЕДЕЛЬНЫХ ТЕРРИТОРИЙ РУССКОГО СЕВЕРА

В статье рассматриваются самцово-слеговые покрытия как закономерный конструктивный прием завершения построек в условиях господства в народном деревянном зодчестве срубной техники возведения стен. Предпринимается попытка систематизировать многообразие рубленых щипцов покрытий в жилищах и выявить их приоритетные варианты.

Ключевые слова: деревянное зодчество, традиционные конструктивные приемы, самцово-слеговые покрытия, рубленые щипцы

Конструкции несущей части покрытия в традиционных деревянных жилищах Карелии и сопредельных с ней территорий недостаточно изучены. Как правило, исследователей больше интересовало устройство верхнего слоя покрытия – кровли, нежели его остова. Настоящая статья посвящена анализу конструкций самцово-слеговых крыш и является продолжением нашего исследования традиционных деревянных покрытий [8].

По литературным данным известно, что в древности внутреннее пространство наземных срубных жилищ было единым, перекрытия в нем отсутствовали. Единство внутреннего пространства, пригодного для круглогодичного проживания, проще всего могло достигаться единством конструкции стен и покрытия. Логично полагать, что приемы, первоначально выработанные при возведении стен, были перенесены и на покрытие. При этом, по археологическим данным, применительно к наземному жилищу в Карелии издревле форма ограждающей интерьер конструкции генетически тяготела либо к чуму, либо к подпрямоугольной в плане постройке со скатным покрытием. Что же касается горизонтальных накатов из бревен, зафиксированных в поздних лесных избушках и в некоторых хозяйственных постройках (например, банях), то бытует мнение, что они генетически восходят к покрытиям землянок и потому являются древнейшим типом покрытий. Однако жилище в виде землянок в лесной полосе европейской части России археологически не зафиксировано [2; 14], а в существовавших в древности полуземлянках горизонтальный накат не мог применяться, ибо незначительное заглубление стен до 1 м и использование открытого очага или каменки внутри полуземляночного жилища требовали устройства покрытия определенной высоты подъема, которое возводилось либо в виде конического шалаша, либо двускатным.

До тех пор пока стены и покрытия были конструктивно едины, их развитие шло, по-видимому, примерно одними путями. Важнейшим собы-

тием в обозримой исторической ретроспекции, разделившим направления развития рубленых стен и покрытий, стала дифференциация единого пространства жилища на жилую и нежилую (чердачную) части.

С этого момента нижняя (стены) и верхняя (покрытие) части бывшего единого сруба начинают развиваться по-разному. При этом специфика стен практически не изменилась, а их эволюция свелась в основном к развитию способов сопряжения бревен в срубе (угловые врубки, припазовки и пр.). Эта тема была освещена с позиции этноархитектуроведения в ряде наших работ [3], [4], [5], [6], [7]. Что же касается покрытий, то, в отличие от стен, они претерпели функциональные изменения, связанные в первую очередь с их теплотехническими характеристиками. Если до дифференциации роль барьера для сохранения распространяющегося вверх теплого воздуха играло непосредственно покрытие, то с разделением пространства эта функция стала возлагаться на перекрытие и буферное воздушное пространство чердачного помещения. Покрытию же теперь отводилась роль остова для кровли. Такая переориентация существенно сказалась на дальнейшем развитии покрытий.

В стремлении достигнуть наибольшей эффективности конструктивного решения покрытий проявляется тенденция к их облегчению с сохранением необходимой пространственной жесткости, которая достигалась по-разному. Эту тенденцию мы считаем основным направлением развития покрытий. За ее отправную точку можно принять покрытие древних жилищ, которое, как уже отмечалось, скорее всего, было едино с рублеными стенами, а потому могло иметь идентичную конструкцию и, по-видимому, представляло собой сруб, постепенно сужающийся кверху и образующий сплошное (без зазоров) основание для кровли [12; 62].

Сплошное венчатое покрытие или его фрагменты на Русском Севере достоверно можно обнаружить лишь в оборонном зодчестве. И это не случайно, потому как покрытие здесь выполняет

схожую с покрытием древних жилищ функцию – ограждения, конструкция которого не уступает по своим характеристикам стене. Пример тому – сплошная венчатая конструкция в части покрытия башни тойона Пономарева [9; 177–182].

В качестве рудимента, утратившего свое конструктивное значение, сплошное покрытие применялось в амбарах в виде двускатного бревенчатого наката, элементы которого уже не составляли замкнутых венцов.

Однако по другим регионам существует информация о некогда бытовавших сплошных венчатых покрытиях в древних жилищах, например в Грузии – дом в с. Мтискалта Онского района [13; 75–76].

Стоит отметить важную особенность сплошного венчатого покрытия – это существенная высота подъема, продиктованная технологией рубки из круглого леса. Сразу же напрашивается сравнение с клинчатыми покрытиями культовых построек, особенно старых церквей, где сохранение такой формы покрытий, по-видимому, способствовало решению идейно-художественных задач народного храмостроительства.

После дифференциации внутреннего пространства жилища надобность в сплошной конструкции венчатого покрытия отпала, и потому получили распространение покрытия самцово-слеговые. В своем классическом виде они представляют срубную конструкцию, состоящую из убывающих кверху бревен стен, называемых «самцами», и врубленных в них с интервалами продольных бревен-прогонов, называемых «слегами», которые образуют решетчатое основание для кровли.

Первоначально зазоры между слегами были незначительными. Достигались они за счет меньшего диаметра слеговых бревен по отношению к самцовым и/или устройства более пологих скатов. При этом первоначально каждая из слег врубалась в каждый салец той же угловой рубкой – «в обло», аналогично рубке стен. Таким образом, слеги в месте соединения с самцами оказывались ослабленными примерно на половину их толщины. Впоследствии этот узел стали решать иначе: в слеге устраивалась неглубокая прямоугольная чаша, обращенная вверх, в самцах, обжимавших слегу сверху и снизу, также вырубались под слегу соответствующей формы чаши (в нижнем самце – округлая, в верхнем – прямоугольная, обращенная вниз). Такие соединения в меньшей степени ослабляли слеги и повышали общую жесткость покрытия. Описанные особенности сопряжения несущих элементов покрытий были обнаружены нами в руинированных традиционных постройках.

Интересно, что представление о единстве стен и покрытия в срубном жилище продолжает сохраняться и после их дифференциации, вплоть до сегодняшних дней. Так, современные плотники зачастую под срубом понимают венчатую постройку из бревен, выполненную «вчерне», то

есть только стены и покрытие без кровли, без перекрытий и пр. Однако и после дифференциации развитие стеновых конструкций продолжает оказывать влияние на конструкцию покрытий. Окончательного разрыва между нижней и верхней частями традиционной срубной постройки не происходит. Связующим элементом выступают «щипцы», которые одновременно являются продолжением торцевых стен и частью покрытия.

Проанализировав имеющиеся покрытия со слегами, врубленными в каждый салец, а сохранились они преимущественно в архаичных амбарах и культовых постройках, мы пришли к заключению, что основное назначение такой частой постановки слег – это единственная возможность плотников возвести рубленое покрытие, используя известные для того времени способы сопряжения бревен (угловая рубка и припазовка).

Бытует мнение, что частослеговая конструкция покрытия устраивалась для удерживания кровель из тяжелых материалов. Однако применительно к тесовым крышам такое предположение выглядит несостоятельным. Для тесовых кровель нет необходимости в таком частом расположении слег, что подтверждают сохранившиеся старинные постройки, в покрытиях которых встречаются выпуски не всех, а лишь части слег за пределы сруба для поддержания выноса кровли. Так, например, устроено покрытие молитвенного помещения небольшой сямозерской часовни XVII века в д. Ахпойла. Дальнейшее развитие покрытия в рамках намеченной тенденции облегчения, по данным В. П. Орфинского, связано в основном с постепенным увеличением интервалов между слегами в направлении сверху вниз, то есть увеличение интервала сначала до коньковой слеги, затем до последующей и т. д. [11; 225]. Так постепенно появляются самцово-слеговые покрытия с постановкой слег через один шов между самцами. При этом возможное смещение частей покрытия по не связанному со слегами шву могло устраняться с помощью «засека» – зубчатого соединения, образованного за счет чередования нижней и верхней припазовки в самцах [10; 13].

Следующий этап развития самцово-слеговых покрытий – появление свободных самцов (не связанных со слегами), вызванных еще большим разрежением слег. Задача крепления свободных самцов в покрытии решалась двояко. В одном случае этому способствовало развитие плотницкого инструментария и появление новых приемов. Так, в срубном строительстве начинают применяться соединения на нагелях, сначала пластинчатых, затем стержневых (гранных и цилиндрических). При таких потайных креплениях визуально щипцы покрытия выглядят, как и прежде, с той лишь разницей, что интервал между слегами становится больше. В другом случае задача решается традиционны-

ми плотницкими приемами: щипцы между собой соединяются продольными бревенчатыми стенами – перерубами, которые связывают все самцы. При таком приеме к внешнему виду прежних щипцов добавляются выступающие наружу остатки перерубов.

Все отмеченные выше дополнительные приемы крепления бревен были сначала отработаны на стенах, а затем уже перенесены на покрытия.

Детально не останавливаясь на самцово-слеговых покрытиях с перерубами, отметим только, что, по нашим наблюдениям, их эволюционные преобразования также связаны с тенденцией облегчения конструкции: перерубы из бревен сменялись совмещенными перерубами из чередующихся бревен и коротышей, а затем только из коротышей. Что же касается классических самцово-слеговых покрытий, то своего апогея тенденция их облегчения достигает в покрытиях с одной слегой на скате при средних и крупных размерах построек, а на малых постройках – только с одной коньковой слегой.

Используя материалы натурных исследований деревянного зодчества на территории Карелии, фактически приближенные к сплошным, и зондажные – по Вологодской, Ленинградской и Архангельской областям [1], мы провели анализ самцово-слеговых покрытий в жилищах конца XIX – первой половины XX века. В анализ включены только покрытия с симметричными скатами, величина уклона которых на исследуемой территории, по нашим данным, изменяется в пределах от 25 до 39°, а наиболее массовые значения – в диапазоне 30–37°. В процессе исследования обнаружилось большое разнообразие (около 50) вариантов расположения слег на скатах щипцов, которое требовало систематизации.

Поскольку основное отличие самцово-слеговых щипцов состоит в разных интервалах между слемами, систематизирующим признаком было принято количество швов между самцами в интервале между соседними слемами. Такой признак достаточен только для щипцов с равномерным расположением слег. Большое число вариантов с неравномерно расположенными слемами потребовало их объединения в группы. Принадлежность к группе определяется большим количеством равных интервалов между слемами, а определителем группы выступают щипцы с равномерным распределением слег. Щипцы с равным количеством разных интервалов были выделены в отдельную группу. Особый вариант щипцов – с одной слегой на скат. Для него не ведется подсчет швов, а лишь отмечается срединное или смещенное положение слег.

Распространенные в конце XIX – первой половине XX веков самцово-слеговые щипцы в жилых частях домов на рассматриваемой территории мы разделили на 9 групп (рис. 1): 1 – с преобладанием врубки слег в каждый шов между

самцами, 2 – с преобладанием интервалов между слемами в один шов, 3 – с равным количеством интервалов между слемами в один и два шва, 4 – с преобладанием интервалов между слемами в два шва, 5 – с преобладанием интервалов между слемами в три шва, 6 – с разными интервалами между слемами, 7 – с преобладанием интервалов между слемами в четыре шва, 8 – с одной слегой на скат, 9 – только с коньковой слегой.

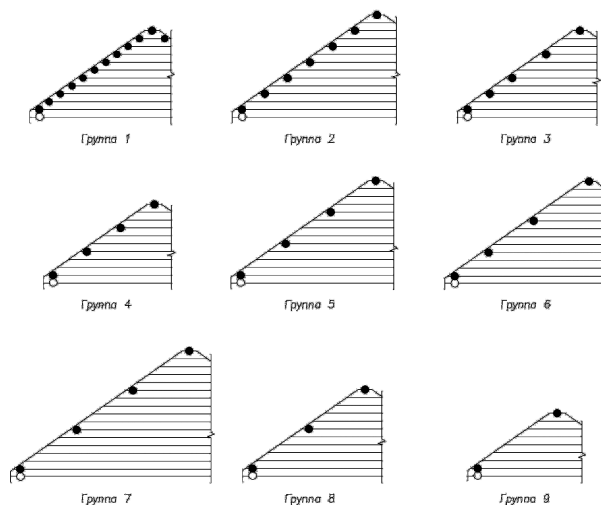


Рис. 1. Примеры конструктивных схем рубленых щипцов разных групп

На основании предложенной систематизации была сформирована база данных самцово-слеговых щипцов в традиционном жилище Карелии и сопредельных территорий, позволяющая проводить статистические исследования с последующим выходом на картографирование. Анализ базы данных показал, что действительно преобладающим, но не единственным направлением тенденции облегчения самцово-слеговых покрытий является направление сверху вниз. Удалось выявить и другие приемы разрежения слег (облегчения покрытия). К ним относятся увеличение интервалов между слемами в направлении снизу вверх и в средней части ската.

В результате исследования были получены следующие данные.

1. На территории Карелии выявлены три наиболее распространенные группы щипцов. Самым массовым приемом являются щипцы с преобладающим интервалом между слемами в два межсамцовых шва (группа 4), а самым часто встречаемым их вариантом – щипцы с равномерной постановкой слег. Ареал таких щипцов сосредоточен в юго-восточной части Карелии (рис. 2).

На втором месте – щипцы с одной слегой на скат (группа 8) с преобладанием ее расположения посередине ската. Их ареал сосредоточен преимущественно в Беломорской Карелии (рис. 3). Третье место занимают щипцы с преобладанием интервала в один шов (груп-

па 2), самый распространенный вариант с равномерной постановкой слег. Они встречаются в основном в Пудожском районе (рис. 4).

Таким образом, можно заключить, что щипцы с часто врубленными слегами распространены в традиционном жилище юго-востока Карелии, а на северо-западе края преобладают щипцы с редкой постановкой слег. Следует также отметить стремление народных мастеров к симметричному и равномерному расположению слег по скатам, выпуски которых, создавая свой ритм, в большинстве случаев читаются на главных фасадах. Подтверждают такую тенденцию, связанную со стремлением в народной архитектуре к регулярно упорядоченным конструктивным решениям, и примеры, когда количество межсамцовых швов между слегами отличается, но бревна для самцов подобраны таким образом, что визуальными интервалами между слегами оказываются равными (примеры известны не только в Карелии, но также в Архангельской области).

2. В Архангельской области (Плесецкий и Каргопольский районы), Вологодской области (Вытегорский и Бабаевский районы) и Ленинградской области (Бокситогорский район) самым распространенным приемом являются щипцы с преобладанием интервала в один шов (группа 2) (рис. 4), за ним следуют щипцы с преоб-

ладающим интервалом между слегами в два межсамцовых шва (группа 4) (рис. 2). Щипцы с равномерными интервалами между слегами несущественно преобладают над щипцами с неравномерной постановкой слег.

Примечательно, что только в Каргопольском районе в покрытиях жилищ конца XIX – первой половины XX века зафиксировано несколько случаев наиболее архаичного приема устройства щипцов с врубкой слег в каждый шов (группа 1). Исключение составил лишь интервал в несколько швов до коньковой слег. По-видимому, это было вызвано на позднем этапе эволюции необходимостью вывода наружу труб печей «побелому».

В заключение можно отметить, что проведенное исследование классических самцово-слеговых покрытий в Карелии и сопредельных районах Русского Севера позволило определить их приоритетные варианты и закономерности территориального распределения последних. Так, более архаичные частослеговые конструкции покрытий (группы 2 и 4) абсолютно преобладают в юго-восточной части исследуемой территории. Кроме того, их распространение прослеживается в направлении северо-запада, где лидирующее положение занимают уже самые легкие из всех самцово-слеговых крыш – покры-

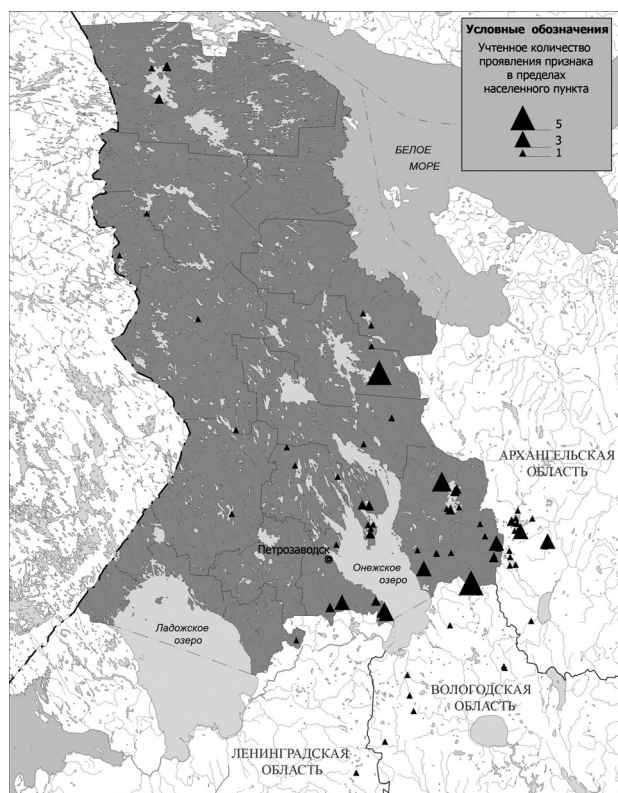


Рис. 2. Ареал распространения щипцов с преобладающим интервалом между слегами в два межсамцовых шва (группа 4) в рубленых покрытиях жилища Карелии и сопредельных территорий в конце XIX – первой половине XX века

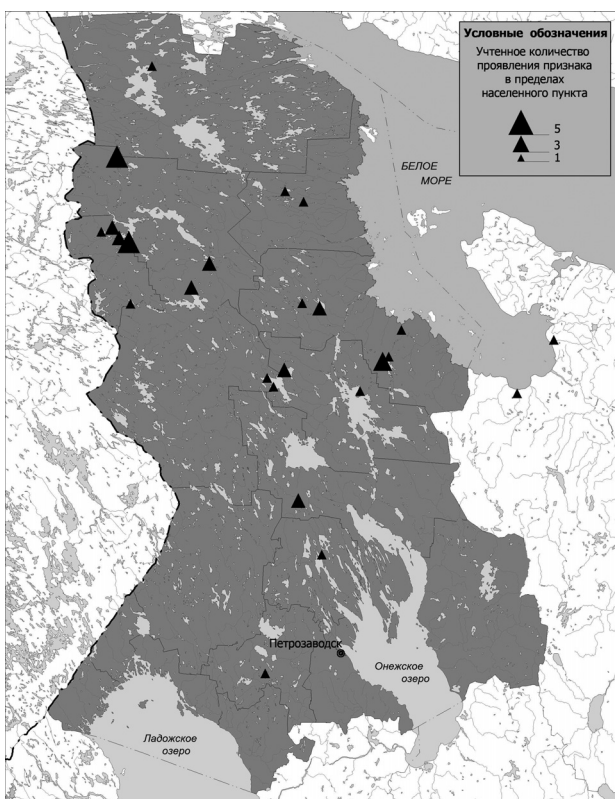


Рис. 3. Ареал распространения щипцов с одной слегой на скат (группа 8) в рубленых покрытиях жилища Карелии в конце XIX – первой половине XX века

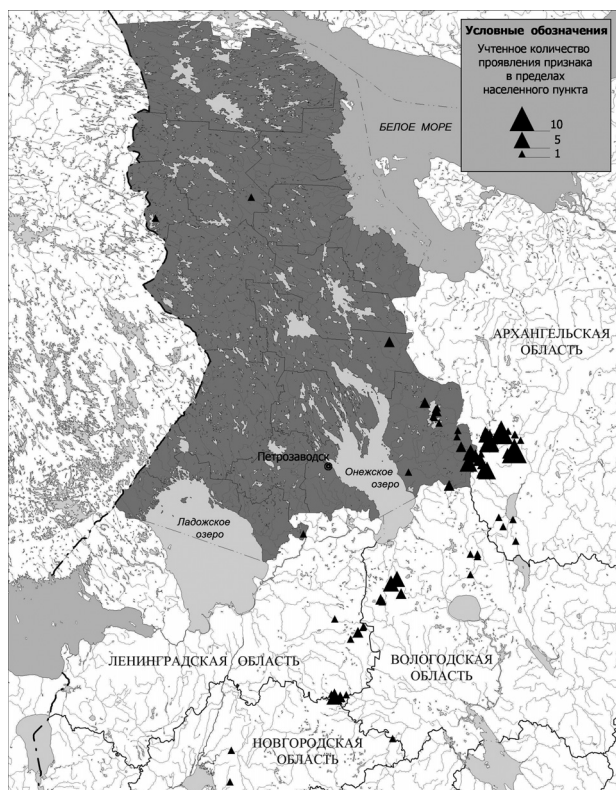


Рис. 4. Ареал распространения щипцов с преобладающим интервалом между слегами в один шов (группа 2) в рубленых покрытиях жилища Карелии и сопредельных территорий в конце XIX – первой половине XX века

тия с одной слегой на скат и комбинированные самцово-слеговые с внутренними стропильными конструкциями. Причиной тому может быть влияние на зодчество северо-запада Карелии строительной культуры Поморья, где достаточно рано обозначился переход от рубленых к легким каркасным покрытиям. Отсутствие классических самцово-слеговых покрытий в жилищах юго-запада Карелии объясняется повсеместным распространением там другого типа конструкции покрытий – самцово-слеговых с перерубами. Причины активного развития и сохранения покрытий с перерубами на указанной территории еще предстоит выяснить.

Выявление ареалов классических самцово-слеговых покрытий стало возможным в результате первичной систематизации собранного нами материала, которая может послужить для создания классификационной системы традиционных покрытий. Кроме того, в качестве дальнейшего развития представленного исследования планируется рассмотреть самцово-слеговые покрытия совместно с другими конструкциями крестьянских домов применительно к конкретным территориям Русского Севера для решения актуальных задач этноархитектуроведения по определению локальной специфики конструктивных систем и деталей в рамках их региональной общности и выявлению этнических особенностей в традиционных конструктивных системах.

ИСТОЧНИК

1. Архив Научно-исследовательского института историко-теоретических проблем деревянного зодчества ПетрГУ.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

2. Жульников А. М. Древние жилища Карелии. Петрозаводск: Скандинавия, 2003. 200 с.
3. Косенков А. Ю. К вопросу о систематизации стеновых срубных конструкций в традиционном деревянном зодчестве Русского Севера // Вестник БГТУ им. В. Г. Шухова. 2009. № 4. С. 56–63.
4. 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.
5. Косенков А. Ю. Классификация стен в традиционном деревянном зодчестве Карелии и сопредельных территорий Русского Севера. Ч. 2 // Ученые записки Петрозаводского государственного университета. Сер. «Естественные и технические науки». 2010. № 4(109). С. 86–97.
6. Косенков А. Ю. Венчатые конструкции в народном зодчестве (на примере Карелии и сопредельных территорий) // Архитектурное наследие. Вып. 52. М., 2010. С. 117–134.
7. Косенков А. Ю. Традиционные срубные конструкции в Кенозерье и Лекшмозерье // Кенозерские чтения-2009. Этнокультурный ландшафт Кенозерья: междисциплинарное исследование на пересечении естественных и гуманитарных наук. Архангельск, 2011. С. 191–195.
8. Косенков А. Ю. К вопросу о систематизации самцово-слеговых покрытий в жилище Карелии // Рябининские чтения – 2011. Петрозаводск, 2011. С. 85–86.
9. Крадин Н. П. Русское деревянное оборонное зодчество. М.: Искусство, 1988. 142 с.
10. Красноречев Л. Е. Исследование и реставрация памятников деревянного зодчества. По опыту работ в Новгородской области. СПб.: Дмитрий Буланин, 1999. 59 с.
11. Орфинский В. П. Деревянное зодчество Карелии. Генезис, эволюция, национальные особенности: Дис. ... д-ра архитектуры. Т. I. М.: ЦНИИТИА, 1975.
12. Сумбадзе Л. Венчатые покрытия в русском народном зодчестве // Архитектурное наследие. Вып. 10. М., 1958.
13. Сумбадзе Л. Архитектура грузинского народного жилища дарбази. Тбилиси: Мецниереба, 1984. 359 с.

АНАТОЛИЙ АЛЕКСЕЕВИЧ РОЧЕВ

кандидат технических наук, доцент кафедры архитектуры, строительных конструкций и геотехники строительного факультета, Петрозаводский государственный университет
metalll@bk.ru

О РАСЧЕТЕ РАМНЫХ СИСТЕМ ИЗ НЕУПРУГИХ СОСТАВНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ

В работе получено решение задачи деформационного расчета неупругих плоских статически неопределимых рамных систем из составных стержней, имеющих переменное поперечное сечение и переменную жесткость связей сдвига по длине. В основу решения положена теория составных стержней А. Р. Ржаницына. Используются метод деформаций и ранее полученное автором выражение для определения эквивалентного модуля деформаций.

Ключевые слова: плоская статически неопределимая рамная система, деформационный расчет, эквивалентный модуль деформаций

Рассматриваются плоские статически неопределимые рамные системы, включающие в себя упругопластические составные элементы, выполненные из ветвей, соединенных между собой структурными связями в виде планок, раскосов, распорок, перфорированных листов. Составные элементы имеют переменное поперечное сечение и переменную жесткость связей сдвига по длине элемента.

В работе применяются основные положения общей теории составных стержней, разработанной А. Р. Ржаницыным [3]. Для материала ветвей и связей, расположенных между ветвями составного стержня, устанавливается произвольная зависимость между деформациями и напряжением. Используется гипотеза о нелинейно-упругом материале, основанная на теореме, доказанной Л. М. Качановым в [2]. Раскрытие статической неопределимости рамной системы осуществляется методом деформаций с учетом влияния продольных сил.

Для определения перемещений плоской рамы элементы многоконтурного стержня рамы делятся по длине на участки постоянной жесткости (в общем случае неравные) длиной l_j между узловыми точками j и $j+1$. В узлы элементов рамы вводятся моментные $1j$ и силовые $2j$ связи, образующие основную систему метода деформаций. Расчет такой рамы производится шаговым методом [1]. Перемещения сечений и узлов рамы $Z_{1j}^{(i)}$ и $Z_{2j}^{(i)}$ определяются из решения системы уравнений

$$\sum_{k=1}^{m-1} (R_{1j1k}^{(i)} Z_{1k}^{(i)} + R_{1j2k}^{(i)} Z_{2k}^{(i)}) + R_{1jp}^{(i)} = 0, \quad (1)$$

$$\sum_{k=1}^{m-1} (R_{2j1k}^{(i)} Z_{1k}^{(i)} + R_{2j2k}^{(i)} Z_{2k}^{(i)}) + R_{2jp}^{(i)} = 0,$$

$$j = 1..m-1,$$

где $R_{1j1k}^{(i)}$ и $R_{1j2k}^{(i)}$ – реакции в связях $1j$ от перемещения связей $1k$ и $2k$, определенные с учетом влияния продольных сил на i -м шаге нагружения;

$R_{2j1k}^{(i)}$ и $R_{2j2k}^{(i)}$ – то же, но в связях $2j$; $R_{1p}^{(i)}$ и $R_{2p}^{(i)}$ – реакции в связях $1j$ и $2j$ от внешней нагрузки на i -м шаге нагружения.

При определении реакций во введенных связях j -й участок элемента рамы рассматривается как жестко защемленный по концам составной стержень длиной l_j . Дифференциальное уравнение изгиба упругого двухветвевго ($n=2$) составного стержня было получено в [3]. При работе за пределом упругости уравнение для j -го участка элемента рамы, в котором действует продольная сила $N_j^{(i)}$, будет иметь вид

$$v_j^{IV(i)} + n v_j^{''(i)} (N_j^{(i)} / C_{xj}^{equ(i)} - \lambda_j^{2(i)}) - v_j^{(i)} N_j^{(i)} \lambda_j^{2(i)} / C_{oj}^{(i)} = 0, \quad (2)$$

где $v_j^{(i)}$ – прогибы j -го участка элемента рамы на i -м шаге нагружения; $C_{xj}^{equ(i)}$ – суммарная эквивалентная жесткость ветвей составного элемента на j -м участке элемента рамы при i -м шаге нагружения, равная

$$C_{xj}^{equ(i)} = \sum_{v=1}^n (E_{jv}^{equ(i)} J_{xjv}), \quad (3)$$

здесь $E_{jv}^{equ(i)}$ – эквивалентный модуль деформаций для сечений v -й ветви j -го участка элемента рамы на i -м шаге нагружения; J_{xjv} – момент инерции поперечного сечения v -й ветви, постоянный по длине j -го участка элемента рамы, $C_{oj}^{(i)}$ – приведенная жесткость сечения j -го участка элемента рамы как монолитного на i -м шаге нагружения, равная

$$C_{oj}^{(i)} = C_{xj}^{equ(i)} + E_{cj1}^{(i)} A_{j1} E_{cj2}^{(i)} A_{j2} c_j^2 / (\sum_{v=1}^n (E_{cjv}^{(i)} A_{jv})), \quad (4)$$

здесь A_{j1} и A_{j2} – площадь поперечного сечения ветвей 1 и 2 j -го участка элемента рамы; c_j – расстояние между центрами тяжести ветвей составного элемента; $E_{cj1}^{(i)}$ и $E_{cj2}^{(i)}$ – секущие модули деформаций осевых волокон ветвей 1 и 2 на i -м шаге нагружения;

$$\lambda_j^{(i)} = \sqrt{\xi_j^{(i)} \left[\sum_{v=1}^n (1/(E_{jv}^{(i)} A_{jv}) + c_j^2 / C_{xj}^{equ(i)}) \right]}, \quad (5)$$

здесь $\xi_j^{(i)}$ – коэффициент жесткости продольных связей сдвига на j -м участке элемента рамы при i -м шаге нагружения.

Величина $E_{jv}^{equ(i)}$ в (3) определяется по формуле [4]:

$$E_{jv}^{equ(i)} = \frac{M_{xjv}^{(i-1)} h_{jv} (1 - \varepsilon_{ojv}^{(i-1)})}{(\Delta \varepsilon_{jv}^{(i-1)} - \gamma_{1jv}^{(i-1)} h_{jv} Q_{xjv}^{(i-1)}) J_{xjv}}, \quad (6)$$

где $M_{xjv}^{(i-1)}$ – наибольший изгибающий момент, действующий в сечении v -й ветви j -го участка элемента рамы на $(i-1)$ -м шаге нагружения; h_{jv} – высота поперечного сечения v -й ветви j -го участка элемента рамы; $\varepsilon_{ojv}^{(i-1)}$ – линейная деформация оси v -й ветви j -го участка элемента рамы на $(i-1)$ -м шаге нагружения; $\Delta \varepsilon_{jv}^{(i-1)} = \varepsilon_{1jv}^{(i-1)} - \varepsilon_{2jv}^{(i-1)}$; $\varepsilon_{1jv}^{(i-1)}$ и $\varepsilon_{2jv}^{(i-1)}$ – крайевые линейные деформации в волокнах поперечного сечения v -й ветви j -го участка элемента рамы, возникающие в соответствии с гипотезой плоских сечений на $(i-1)$ -м шаге нагружения; $\gamma_{1jv}^{(i-1)}$ – угол сдвига v -й ветви на j -м участке элемента рамы от единичной поперечной силы при $(i-1)$ -м шаге нагружения; $Q_{xjv}^{(i-1)}$ – первая производная от поперечной силы, действующей v -й ветви j -го участка элемента рамы при $(i-1)$ -м шаге нагружения.

Общее решение уравнения (2) имеет вид

$$v_j^{(i)} = \bar{C}_{1j}^{(i)} ch(k_{1j}^{(i)} z_j) + \bar{C}_{2j}^{(i)} sh(k_{1j}^{(i)} z_j) + \bar{C}_{3j}^{(i)} ch(k_{2j}^{(i)} z_j) + \bar{C}_{4j}^{(i)} sh(k_{2j}^{(i)} z_j), \quad (7)$$

где

$$(k_{1j}^{(i)})^2 = \frac{-N_j^{(i)} + \lambda_j^{(i)} C_{xj}^{equ(i)}}{2C_{xj}^{equ(i)}} - \frac{\sqrt{N_j^{2(i)} - 2N_j^{(i)} \lambda_j^{(i)} C_{xj}^{equ(i)} + \lambda_j^{2(i)} (C_{xj}^{equ(i)})^2 [\lambda_j^{2(i)} + 4N_j^{(i)}] / C_{oj}^{(i)}}}{2C_{xj}^{equ(i)}}, \quad (8)$$

$$(k_{1j}^{(i)})^2 = \frac{-N_j^{(i)} + \lambda_j^{(i)} C_{xj}^{equ(i)}}{2C_{xj}^{equ(i)}} + \frac{\sqrt{N_j^{2(i)} - 2N_j^{(i)} \lambda_j^{(i)} C_{xj}^{equ(i)} + \lambda_j^{2(i)} (C_{xj}^{equ(i)})^2 [\lambda_j^{2(i)} + 4N_j^{(i)}] / C_{oj}^{(i)}}}{2C_{xj}^{equ(i)}}. \quad (9)$$

Производные от (7) имеют вид

$$v_j'^{(i)} = \bar{C}_{1j}^{(i)} sh(k_{1j}^{(i)} z_j) k_{1j}^{(i)} + \bar{C}_{2j}^{(i)} ch(k_{1j}^{(i)} z_j) k_{1j}^{(i)} + \bar{C}_{3j}^{(i)} sh(k_{2j}^{(i)} z_j) k_{2j}^{(i)} + \bar{C}_{4j}^{(i)} ch(k_{2j}^{(i)} z_j) k_{2j}^{(i)}, \quad (10)$$

$$v_j''^{(i)} = \bar{C}_{1j}^{(i)} ch(k_{1j}^{(i)} z_j) k_{1j}^{2(i)} + \bar{C}_{2j}^{(i)} sh(k_{1j}^{(i)} z_j) k_{1j}^{2(i)} + \bar{C}_{3j}^{(i)} ch(k_{2j}^{(i)} z_j) k_{2j}^{2(i)} + \bar{C}_{4j}^{(i)} sh(k_{2j}^{(i)} z_j) k_{2j}^{2(i)}, \quad (11)$$

$$v_j'''^{(i)} = \bar{C}_{1j}^{(i)} sh(k_{1j}^{(i)} z_j) k_{1j}^{3(i)} + \bar{C}_{2j}^{(i)} ch(k_{1j}^{(i)} z_j) k_{1j}^{3(i)} + \bar{C}_{3j}^{(i)} sh(k_{2j}^{(i)} z_j) k_{2j}^{3(i)} + \bar{C}_{4j}^{(i)} ch(k_{2j}^{(i)} z_j) k_{2j}^{3(i)}, \quad (12)$$

$$v_j^{IV(i)} = \bar{C}_{1j}^{(i)} ch(k_{1j}^{(i)} z_j) k_{1j}^{4(i)} + \bar{C}_{2j}^{(i)} sh(k_{1j}^{(i)} z_j) k_{1j}^{4(i)} + \bar{C}_{3j}^{(i)} ch(k_{2j}^{(i)} z_j) k_{2j}^{4(i)} + \bar{C}_{4j}^{(i)} sh(k_{2j}^{(i)} z_j) k_{2j}^{4(i)}. \quad (13)$$

Значения функции (7) ее производных (10)–(13) при $z_j = 0$ будут равны

$$v_{jo}^{(i)} = \bar{C}_{1j}^{(i)} + \bar{C}_{3j}^{(i)}, \quad (14)$$

$$v_{jo}'^{(i)} = \bar{C}_{2j}^{(i)} k_{1j}^{(i)} + \bar{C}_{4j}^{(i)} k_{2j}^{(i)}, \quad (15)$$

$$v_{jo}''^{(i)} = \bar{C}_{1j}^{(i)} k_{1j}^{2(i)} + \bar{C}_{3j}^{(i)} k_{2j}^{2(i)}, \quad (16)$$

$$v_{jo}^{IV(i)} = \bar{C}_{2j}^{(i)} k_{1j}^{3(i)} + \bar{C}_{4j}^{(i)} k_{2j}^{3(i)}. \quad (17)$$

Начальные параметры $v_{jo}^{(i)}$, $v_{jo}'^{(i)}$, $v_{jo}''^{(i)}$ и $v_{jo}^{IV(i)}$ связаны с усилиями в связях сдвига $\tau_{jo}^{(i)}$ и суммарными сдвигающими усилиями $T_{jo}^{(i)}$, действующими в поперечном сечении с координатой $z_j = 0$, следующими зависимостями:

$$T_{jo}^{(i)} = (M_{xjo}^{(i)} + N_j^{(i)} v_{jo}^{(i)} + v_{jo}''^{(i)} C_{xj}^{equ(i)}) / c_j, \quad (18)$$

$$\tau_{jo}^{(i)} = (Q_{jo}^{(i)} + N_j^{(i)} v_{jo}'^{(i)} + v_{jo}'''^{(i)} C_{xj}^{equ(i)}) / c_j, \quad (19)$$

где $M_{xjo}^{(i)}$ и $Q_{jo}^{(i)}$ – соответственно изгибающий момент и поперечная сила в сечении с координатой $z_j = 0$ участка j составного стержня рамы от внешней поперечной нагрузки (без учета усилий, передающихся от связей сдвига); c_j – расстояние между центрами тяжести ветвей составного стержня.

Решая совместно (14)–(19), получаем

$$\bar{C}_{1j}^{(i)} = -(C_{xj}^{equ(i)} v_{jo}^{(i)} k_{2j}^{2(i)} - T_{jo}^{(i)} c_j + M_{xjo}^{(i)} + N_j^{(i)} v_{jo}^{(i)}) / [C_{xj}^{equ(i)} (k_{1j}^{2(i)} - k_{2j}^{2(i)})], \quad (20)$$

$$\bar{C}_{2j}^{(i)} = -(C_{xj}^{equ(i)} v_{jo}'^{(i)} k_{2j}^{2(i)} - \tau_{jo}^{(i)} c_j + Q_{jo}^{(i)} + N_j^{(i)} v_{jo}'^{(i)}) / [C_{xj}^{equ(i)} k_{1j}^{(i)} (k_{1j}^{2(i)} - k_{2j}^{2(i)})], \quad (21)$$

$$\bar{C}_{3j}^{(i)} = (C_{xj}^{equ(i)} v_{jo}^{(i)} k_{1j}^{2(i)} - T_{jo}^{(i)} c_j + M_{xjo}^{(i)} + N_j^{(i)} v_{jo}^{(i)}) / [C_{xj}^{equ(i)} (k_{1j}^{2(i)} - k_{2j}^{2(i)})], \quad (22)$$

$$\bar{C}_{4j}^{(i)} = (C_{xj}^{equ(i)} v_{jo}'^{(i)} k_{1j}^{2(i)} - \tau_{jo}^{(i)} c_j + Q_{jo}^{(i)} + N_j^{(i)} v_{jo}'^{(i)}) / [C_{xj}^{equ(i)} k_{2j}^{(i)} (k_{1j}^{2(i)} - k_{2j}^{2(i)})]. \quad (23)$$

При повороте узла j на угол, равный φ_0 , в нем будут соблюдаться следующие граничные условия (в случае жестких на сдвиг торцов этого стержня):

$$v_{jo}^{(i)} = 0, \quad v_{jo}'^{(i)} = \varphi_0, \quad \tau_{jo}^{(i)} = 0, \quad (24)$$

а в узле $j + 1$: $v_{j+1,j}^{(i)} = 0$, $v_{j+1,j}'^{(i)} = 0$, $\tau_{j+1,j}^{(i)} = 0$, где $\tau_{jo}^{(i)}$ и $\tau_{j+1,j}^{(i)}$ – усилия в связях сдвига по концам j -го участка составного стержня рамы.

Подстановка $\bar{C}_{1j}^{(i)} \dots \bar{C}_{4j}^{(i)}$ в уравнения (10), (11) и (19) с учетом (24) и (25) дает систему линейных алгебраических уравнений

$$\begin{aligned} A_{11j}^{(i)} M_{xjo}^{(i)} + A_{12j}^{(i)} Q_{jo}^{(i)} + A_{13j}^{(i)} T_{jo}^{(i)} &= V_{1j}^{(i)}, \\ A_{21j}^{(i)} M_{xjo}^{(i)} + A_{22j}^{(i)} Q_{jo}^{(i)} + A_{23j}^{(i)} T_{jo}^{(i)} &= V_{2j}^{(i)}, \\ A_{31j}^{(i)} M_{xjo}^{(i)} + A_{32j}^{(i)} Q_{jo}^{(i)} + A_{33j}^{(i)} T_{jo}^{(i)} &= V_{3j}^{(i)}, \end{aligned} \quad (26)$$

где

$$\begin{aligned}
 A_{11}^{(i)} &= -[ch(k_1^{(i)}l_j) - ch(k_2^{(i)}l_j)] / [C_{sj}^{equ(i)}(k_1^{2(i)} - k_2^{2(i)})]; \\
 A_{12}^{(i)} &= -[sh(k_1^{(i)}l_j) / k_1^{(i)} - sh(k_2^{(i)}l_j) / k_2^{(i)}] / [C_{sj}^{equ(i)}(k_1^{2(i)} - k_2^{2(i)})]; \\
 A_{21}^{(i)} &= c_j [ch(k_1^{(i)}l_j) - ch(k_2^{(i)}l_j)] / [C_{sj}^{equ(i)}(k_1^{2(i)} - k_2^{2(i)})]; \\
 A_{22}^{(i)} &= [sh(k_2^{(i)}l_j)k_2^{(i)} - sh(k_1^{(i)}l_j)k_1^{(i)}] / [C_{sj}^{equ(i)}(k_1^{2(i)} - k_2^{2(i)})]; \\
 A_{23}^{(i)} &= -[ch(k_1^{(i)}l_j) - ch(k_2^{(i)}l_j)] / [C_{sj}^{equ(i)}(k_1^{2(i)} - k_2^{2(i)})]; \\
 A_{33}^{(i)} &= c_j [sh(k_1^{(i)}l_j)k_1^{(i)} - sh(k_2^{(i)}l_j)k_2^{(i)}] / [C_{sj}^{equ(i)}(k_1^{2(i)} - k_2^{2(i)})]; \\
 A_{31}^{(i)} &= \{ [sh(k_1^{(i)}l_j)k_1^{3(i)} - sh(k_2^{(i)}l_j)k_2^{3(i)}] / (k_1^{2(i)} - k_2^{2(i)}) + \\
 &+ P [sh(k_1^{(i)}l_j)k_1^{(i)} - sh(k_2^{(i)}l_j)k_2^{(i)}] / [C_{sj}^{equ(i)}(k_1^{2(i)} - k_2^{2(i)})] \} / c_j; \\
 A_{32}^{(i)} &= \{ [ch(k_1^{(i)}l_j)k_1^{2(i)} - ch(k_2^{(i)}l_j)k_2^{2(i)}] / (k_1^{2(i)} - k_2^{2(i)}) - \\
 &- I + N_j^{(i)} [ch(k_1^{(i)}l_j) - ch(k_2^{(i)}l_j)] / [C_{sj}^{equ(i)}(k_1^{2(i)} - k_2^{2(i)})] \} / c_j; \\
 A_{33}^{(i)} &= -\{ [sh(k_1^{(i)}l_j)k_1^{3(i)} - sh(k_2^{(i)}l_j)k_2^{3(i)}] / (k_1^{2(i)} - k_2^{2(i)}) + \\
 &+ N_j^{(i)} [sh(k_1^{(i)}l_j)k_1^{(i)} - sh(k_2^{(i)}l_j)k_2^{(i)}] / [C_{sj}^{equ(i)}(k_1^{2(i)} - k_2^{2(i)})] \}.
 \end{aligned} \quad (27)$$

В (26) свободные члены определяются по формулам

$$\begin{aligned}
 V_1^{(i)} &= -\varphi_0 \{ [(N_j^{(i)} + C_{sj}^{equ(i)}k_1^{2(i)}) sh(k_2^{(i)}l_j) / k_2^{(i)} - \\
 &- (N_j^{(i)} + C_{sj}^{equ(i)}k_2^{2(i)}) sh(k_1^{(i)}l_j) / k_1^{(i)}] / [C_{sj}^{equ(i)}(k_1^{2(i)} - k_2^{2(i)})] \}; \\
 V_2^{(i)} &= \varphi_0 \{ I - [(N_j^{(i)} + C_{sj}^{equ(i)}k_1^{2(i)}) ch(k_2^{(i)}l_j) - \\
 &- [(N_j^{(i)} + C_{sj}^{equ(i)}k_2^{2(i)}) ch(k_1^{(i)}l_j)] / [C_{sj}^{equ(i)}(k_1^{2(i)} - k_2^{2(i)})] \} \}; \\
 V_3^{(i)} &= \varphi_0 \{ [(N_j^{(i)} + C_{sj}^{equ(i)}k_1^{2(i)}) ch(k_2^{(i)}l_j) - \\
 &- (N_j^{(i)} + C_{sj}^{equ(i)}k_2^{2(i)}) ch(k_1^{(i)}l_j) k_1^{2(i)} / (k_1^{2(i)} - k_2^{2(i)}) + \\
 &+ N_j^{(i)} [(N_j^{(i)} + C_{sj}^{equ(i)}k_1^{2(i)}) ch(k_2^{(i)}l_j) - \\
 &- (N_j^{(i)} + C_{sj}^{equ(i)}k_2^{2(i)}) ch(k_1^{(i)}l_j) / [C_{sj}^{equ(i)}(k_1^{2(i)} - k_2^{2(i)})]] \} / c_j.
 \end{aligned} \quad (28)$$

Решение системы (28) имеет вид

$$M_{xjo}^{(i)} = D_{1j}^{(i)} / D_j^{(i)}, \quad (29)$$

$$Q_{jo}^{(i)} = D_{2j}^{(i)} / D_j^{(i)}, \quad (30)$$

$$T_{jo}^{(i)} = D_{3j}^{(i)} / D_j^{(i)}, \quad (31)$$

где $D_{1j}^{(i)}$, $D_{2j}^{(i)}$, $D_{3j}^{(i)}$, $D_j^{(i)}$ – определители метода Крамера для решения системы (26).

Изгибающий момент на опоре с координатой $z_j = l_j$ рассчитывается при этом по формуле

$$M_{xjl}^{(i)} = M_{xjo}^{(i)} + Q_{jo}^{(i)}l_j. \quad (32)$$

При осадке опоры рассматриваемого стержня с координатой $z_j = 0$ на величину δ_0 будут соблюдаться следующие граничные условия (в случае жестких на сдвиг торцов этого стержня):

$$v_{jo}^{(i)} = 0, \quad v'_{jo}^{(i)} = 0, \quad \tau_{jo}^{(i)} = 0, \quad (33)$$

$$\text{а в узле } j + I: v_{j,lj}^{(i)} = \delta_0, \quad v'_{j,lj}^{(i)} = 0, \quad \tau_{j,lj}^{(i)} = 0. \quad (34)$$

При этих граничных условиях свободные члены будут равны

$$\begin{aligned}
 V_1^{(i)} &= \delta_0 \{ [(N_j^{(i)} + C_{sj}^{equ(i)}k_2^{2(i)}) ch(k_1^{(i)}l_j) - \\
 &- (N_j^{(i)} + C_{sj}^{equ(i)}k_1^{2(i)}) ch(k_2^{(i)}l_j)] / [C_{sj}^{equ(i)}(k_1^{2(i)} - k_2^{2(i)})] + 2 \}; \\
 V_2^{(i)} &= \delta_0 \{ [(N_j^{(i)} + C_{sj}^{equ(i)}k_2^{2(i)}) sh(k_1^{(i)}l_j)k_1^{(i)} - \\
 &- (N_j^{(i)} + C_{sj}^{equ(i)}k_1^{2(i)}) sh(k_2^{(i)}l_j)k_2^{(i)}] / [C_{sj}^{equ(i)}(k_1^{2(i)} - k_2^{2(i)})] \\
 &- \delta_0 \{ [(N_j^{(i)} + k_1^{2(i)}C_{sj}^{equ(i)}) sh(k_2^{(i)}l_j)k_2^{3(i)} - \\
 &- (N_j^{(i)} + k_2^{2(i)}C_{sj}^{equ(i)}) sh(k_1^{(i)}l_j)k_1^{3(i)}] / (k_1^{2(i)} - k_2^{2(i)}) + \\
 &+ N_j^{(i)} [(N_j^{(i)} + k_1^{2(i)}C_{sj}^{equ(i)}) sh(k_2^{(i)}l_j)k_2^{(i)} - \\
 &- (N_j^{(i)} + k_2^{2(i)}C_{sj}^{equ(i)}) sh(k_1^{(i)}l_j)k_1^{(i)}] / [C_{sj}^{equ(i)}(k_1^{2(i)} - k_2^{2(i)})] \} / c_j.
 \end{aligned} \quad (35)$$

Определение усилий на опорах осуществляется аналогично вышеизложенному для случая поворота узла с координатой $z_j = 0$ на угол φ_0 .

Если j -й составной стержень при $z_j = l_j$ шарнирно оперт, то при повороте j -го узла на угол φ_0 граничные условия (в случае жестких на сдвиг торцов этого стержня) будут следующими:

$$v_{jo}^{(i)} = 0, \quad v'_{jo}^{(i)} = \varphi_0, \quad \tau_{jo}^{(i)} = 0, \quad (36)$$

$$\text{а в узле } j + I: v_{j,lj}^{(i)} = 0, \quad \tau_{j,lj}^{(i)} = 0, \quad M_{xjlj}^{(i)} = 0. \quad (37)$$

При осадке на δ_j опоры с координатой $z_j = l_j$ для составного стержня, шарнирно опертого при $z_j = l_j$, граничные условия (в случае жестких на сдвиг торцов этого стержня) будут:

$$v_{jo}^{(i)} = 0, \quad v'_{jo}^{(i)} = 0, \quad \tau_{jo}^{(i)} = 0, \quad (38)$$

$$\text{а в узле } j + I: v_{j,lj}^{(i)} = \delta_j, \quad \tau_{j,lj}^{(i)} = 0, \quad M_{xjlj}^{(i)} = 0. \quad (39)$$

С учетом (36)–(39) решается система уравнений (26) аналогично тому, как это было показано для j -го участка составного стержня с жестко зашпеленными концами.

Найденные усилия на опорах j -го стержня при $\varphi_0 = I$ и $\delta_0 = I$ далее используются как реакции в связях $R_{1jlk}^{(i)}$, $R_{1j2k}^{(i)}$, $R_{2jlk}^{(i)}$ и $R_{2j2k}^{(i)}$ при решении системы уравнений (1).

Деформационный расчет рамы осуществляется с использованием эквивалентного модуля деформаций $E_{jv}^{equ(i)}$ [4]. Значения параметров, найденных при i -м шаге нагружения, могут быть использованы для проверки устойчивости методом профессора Р. С. Санжаровского [5].

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Биргер И. А. Общие алгоритмы решения задач теории упругости, пластичности и ползучести // Успехи механики деформируемых сред. М.: Наука, 1975. С. 61–73.
2. Качанов Л. М. Теория ползучести. М.: Физматгиз, 1960. 455 с.
3. Ржаницын А. Р. Составные стержни и пластинки. М.: Стройиздат, 1986. 314 с.
4. Рочев А. А. Нелинейная теория расчета сквозных упругопластических статически неопределимых рамных систем // Доклады 58-й конференции профессоров, преподавателей, научных работников, инженеров и аспирантов университета: В 3 ч. Ч. 1. СПб.: СПбГАСУ, 2001. С. 93–94.
5. Санжаровский Р. С. Устойчивость элементов строительных конструкций при ползучести. Л.: Изд-во ЛГУ, 1984. 280 с.

АЛЕКСАНДР МАКСИМОВИЧ ЦЫПУК

доктор технических наук, профессор кафедры технологии и оборудования лесного комплекса лесотехнического факультета, Петрозаводский государственный университет
tsypouk@mail.ru

АНАТОЛИЙ ЭВАЛЬДОВИЧ ЭГИПТИ

кандидат технических наук, доцент кафедры технологии металлов и ремонта лесотехнического факультета, Петрозаводский государственный университет
evald@psu.karelia.ru

ПОДРЕЗЧИК КОРНЕЙ ГОРИЗОНТАЛЬНЫЙ ДЛЯ ЛЕСНЫХ ПИТОМНИКОВ

В статье представлена конструкция подрезчика корней горизонтального для лесных питомников. Рассмотрен процесс резания корней растений, определены параметры рабочего органа.

Ключевые слова: саженцы деревьев, лесной питомник, подрезчик корней, параметры резания корней

Ресурсосберегающая технология лесовосстановительных работ предполагает выращивание крупномерного посадочного материала без пересадки сеянцев из посевного отделения в школьное отделение питомника (перешколивания), при этом возникает задача формирования компактной корневой системы сеянцев. С лесоводческой точки зрения [1] длина корневой системы крупномерного материала, предназначенного для механизированной посадки леса, должна находиться в пределах 0,20...0,25 м, то есть допускается отклонение $\pm 0,02$ м (с округлением) от средней величины. Наибольшее значение для приживаемости растений имеет наличие достаточного количества мелких сосущих корней, так называемая мочковатость.

С технологической точки зрения размеры корневой системы не должны превышать соответствующие размеры посадочного места, образуемого в лесокультурном слое почвы, то есть корневая система должна быть компактной.

В настоящее время задача формирования компактной корневой системы при выращивании в открытом грунте решена для растений, корни которых подрезаются скобой НВС-1,2 или плугом ВПН-2 перед выборкой из посевного отделения питомника и пересадки в школьное отделение [2]. Известна также машина КНУ-1,2, а. с. № 1605977, СССР, которая выполняет подрезку корней в процессе роста сеянцев [3]. Общее для перечисленных машин – толщина ножей не менее 8 мм, что обеспечивает их необходимую жесткость при установке без предварительного напряжения. При подрезке корней возможна пластическая деформация почвы, что меняет ее структуру вокруг развивающихся корней и может привести к их обнажению. Чтобы не допустить этого, толщина горизонтального ножа должна быть минимальной (не более 3 мм), угол заглубления его также стремится к минимуму. Для устойчивого обеспечения заданной глубины подрезки по всей ширине захвата тонкое

полотно ножа должно находиться в напряженном состоянии относительно стоек рамы. Кроме того, для чистого резания корней скорость ножа должна быть не менее 1,2 м/с [7].

Этим условиям отвечает конструкция корнеподрезчика ПК-1,2, разработанного в Петрозаводском госуниверситете [5]. Общий вид этой машины в агрегате с трактором МТЗ-82 представлен на рис. 1.

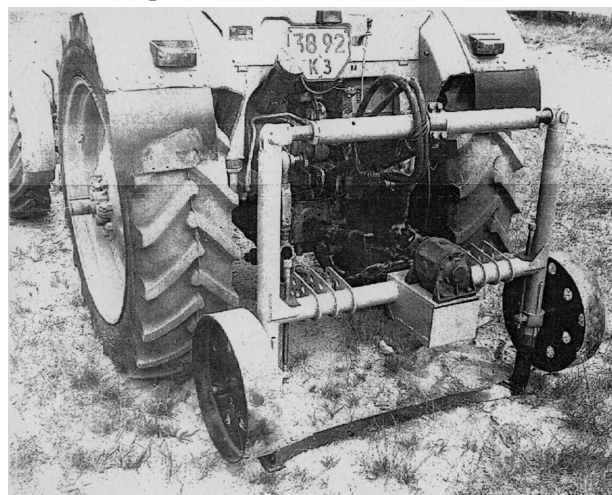


Рис. 1. Общий вид подрезчика корней горизонтального ПКГ-1,2 в агрегате с трактором МТЗ-82

Постоянство глубины подрезки корней достигается путем выполнения стоек корнеподрезчика гибкими, в виде пластин, внутренние поверхности которых установлены под углом в горизонтальной секущей плоскости к направлению движения подрезки корней. При работе подрезчика давление на стойки со стороны почвы вызывает дополнительные растягивающие усилия в рабочем органе (ноже), повышающие устойчивость его хода. Эти усилия связаны с силами, возникающими при смятии почвы стойками ножа. Расчетная схема подрезчика горизонтального ПКГ-1,2 представлена на рис. 2.

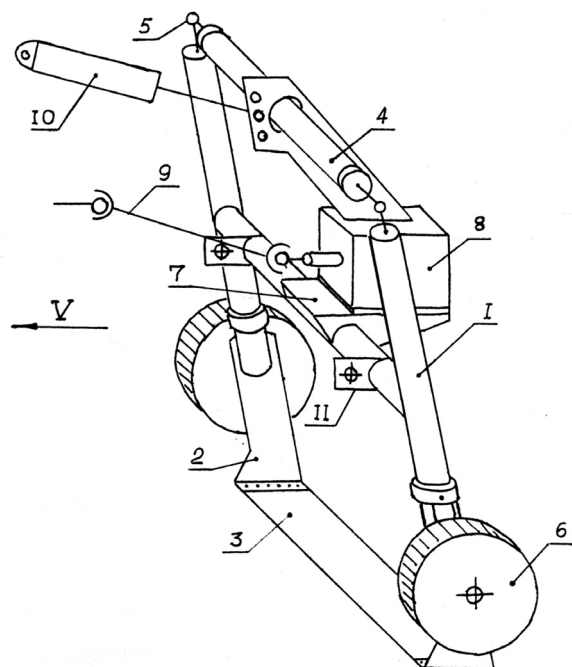


Рис. 2. Подрезчик корней горизонтальный для лесных питомников: 1 – рама; 2 – черенок; 3 – нож; 4 – стяжка; 5 – шарнир; 6 – опорное колесо; 7 – плита; 8 – вибратор; 9 – соединительный вал; 10 – регулятор угла резания; 11 – кронштейн навески

К нижним тягам трактора (на рис. 2 не показаны) подрезчик монтируется кронштейнами 11. Вместо центральной тяги навесной системы на трактор устанавливается гидроцилиндр 10, служащий для регулировки угла резания. Натяжение ножа 3 осуществляется поворотом стяжки 4, при этом усилие на нож передается через шарниры 5 и стойки рамы 1, заканчивающиеся черенками 2, к которым крепится нож. Регулирование хода ножа в почве осуществляется перемещением опорных колес 6 по вертикали. На плите 7 установлен вибратор 8 дебалансного типа (диск со смещенным центром вращения), приводимый в движение от вала отбора мощности трактора через соединительный вал 9 и коническую передачу. Диск установлен параллельно плоскости ножа.

Подрезчик работает следующим образом. Агрегат заезжает на рабочий гон питомника, подрезчик устанавливается в плавающее положение. Регулятором угла резания 10 (гидроцилиндром) нож 3 устанавливается под углом ко дну борозды и в этом положении по ходу заглубляется до упора колесами 6 в поверхность почвы. Затем нож переводится в горизонтальное положение и осуществляется подрезка корней семян при движении агрегата вдоль гона. Нож выполнен из стального заточенного полотна толщиной 3 мм, его работа не вызывает рыхления почвы. При работе на липких почвах для самоочищения ножа включается вибратор 8. Предварительное натяжение ножа осуществляется стяжкой перед началом технологической операции. Необходимое рабочее натяжение производится за счет

растягивающих сил под давлением со стороны почвы на стойки ножа. Угол установки черенков 2 относительно продольного хода подрезчика зависит от внутреннего трения в почве и рекомендуется не более 45° , что обеспечивает самоочищение стоек ножа от почвы в реальных условиях эксплуатации, и не менее 15° для эффективного натяжения полотна ножа по результатам испытаний корнеподрезчика в производственных условиях. Техническая характеристика подрезчика корней ПК-1,2 приведена в таблице.

Техническая характеристика
корнеподрезчика ПК-1,2

Параметр	Значение
Агрегатирование с тракторами	МТЗ-80/82
Частота вращения вала отбора мощности, об./мин	1013
Крутящий момент на входном валу, не более, Н/м (кгс/м)	60 (6,0)
Габаритные размеры с трактором, мм	
• длина	5400
• ширина	2000
• высота	2500
Масса без трактора, не более, кг	480
Древесная порода посадочного материала	Сосна, ель
Возраст в период подрезки, лет	2–4
Количество обрабатываемых рядов, не более	5
Ширина обрабатываемой полосы, не менее, м	0,5
Ширина захвата по колее трактора, м	1,2–1,5
Отклонение от заданной глубины, м	0,02
Рабочая скорость при горизонтальной подрезке корней, км/ч	4,26
Производительность при горизонтальной подрезке корней, га/ч	0,5
Комплектность корнеподрезчика ПК-1,2	ПКГ-1,2 и ПКВ-1,2

Необходимость моделирования процесса работы корнеподрезчика была вызвана вопросами, возникшими в ходе его разработки и испытаний.

Рекомендации по выбору толщины рабочих органов для подрезки корней растений основаны на фундаментальных исследованиях в сельском хозяйстве [3]. В процессе резания корень должен скользить по ножу, обеспечивая его самоочищение. Это достигается установкой лезвия под углом к направлению движения либо достаточной скоростью резания, если нож установлен поперек движения.

При равной ширине захвата поперечный нож получается более коротким и прочным, а возможное забивание его корнями и липкой почвой можно компенсировать включением вибратора с частотой 1000 мин^{-1} (что соответствует 2-му режиму вала отбора мощности трактора). Под влиянием вибрации коэффициент трения почва – сталь понижается примерно в 1,5 раза, и нож остается чистым в любых условиях [7]. Следует отметить, что на супесчаных почвах, преобладающих в лесных питомниках, для

очистки ножа от почвы и растительных остатков включения вибрации не потребовалось, поэтому вибратор следует устанавливать только по желанию заказчика.

С учетом вышеизложенного в конструкции подрезчика корней ПКГ-1,2 принято поперечное расположение ножа. Длина ножа составляет примерно 1200 мм, что соответствует ширине засеваемой полосы около 1 м при установленных в питомнике междурядьях в пределах 1,2...1,4 м.

Ширина полотна по условиям его прочности принята 150 мм. Для изготовления ножа можно рекомендовать инструментальную листовую легированную сталь марки 9ХФМ (ГОСТ5950-2000) толщиной 2,5...3 мм. После придания ножу необходимых размеров производится термическая обработка: режим закалки от 820...840 °С, охлаждение в масляной среде на твердость 61...64 HRC с последующим отпуском в интервале 200...250 °С на твердость 55...58 HRC. В условиях лесного предприятия запасные ножи можно изготавливать из отходной части рамных пил. Схема к определению геометрических параметров рабочего органа горизонтального подрезчика представлена на рис. 3.

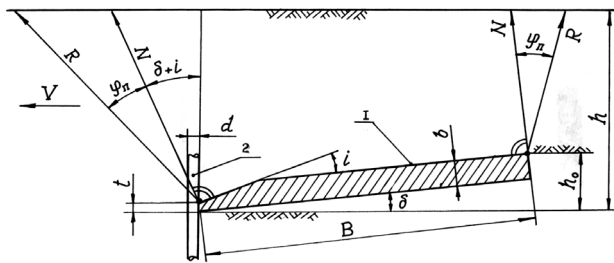


Рис. 3. Схема установки ножа горизонтального подрезчика корней: 1 – нож; 2 – перерезаемый корень; B – ширина ножа; b – толщина ножа; δ – угол установки плоскости ножа к горизонту; i – угол заострения; t – толщина лезвия; h – глубина подрезки; h_0 – деформация слоя почвы; d – диаметр корня; φ_n – угол внутреннего трения; N – граничный вектор давления ножа на почву; R – граничный вектор зоны напряжений в подрезаемом слое почвы

Геометрические параметры ножа определяются величинами, представленными на рис. 3, а также его длиной L (на рис. 3 не обозначено).

Толщина b ножа определена из прочностных характеристик материала (полотно рамной пилы) и с учетом ограничений по максимуму принята равной 2,5 мм. Ширина B ножа равна остаточной ширине рамной пилы (после многих перезаточек) и составляет 150 мм. Длина L ножа принята 1200 мм для обеспечения необходимой ширины захвата подрезчика корней. Угол i заострения принят в соответствии с известными рекомендациями [4] для плоскорежущих лап культиваторов в пределах 12...15°. Толщина t режущей кромки принята 0,3 мм. При большем затуплении ее следует затачивать.

Угол δ установки плоскости ножа к горизонту определяет механику обработки почвы. При увеличении δ возрастает интенсивность кроше-

ния почвы, одновременно растет величина h_0 ее деформации. Нижний предел величины деформаций в пределах упругости почвы составляет 0,3 от толщины подрезаемого слоя почвы [7]; если превысить его, то вероятно разрушение слоя и обнажение корней, что нежелательно при их подрезке.

Уменьшение угла δ обеспечивает лучшую сохранность подрезаемого слоя почвы, но снижает устойчивость хода ножа на заданной глубине. При испытаниях горизонтального подрезчика установлено, что при величине $\delta < 5^\circ$ возможно самовыглубление ножа (вследствие тягового усилия трактора) и уменьшение глубины подрезки, что проявляется в отрыве опорных колес от поверхности почвы.

Из условия сохранности подрезаемого слоя почвы максимальное значение угла установки плоскости ножа к горизонту определится из выражения

$$\frac{b \cdot \cos \delta + B \cdot \sin \delta}{h} \leq [\lambda], \quad (1)$$

где $[\lambda]$ – допустимая величина относительной деформации слоя почвы, принята равной 0,3.

Минимальная глубина подрезки корней, согласно агротехническим требованиям (см. таблицу), составляет 0,08 м, с учетом допустимого отклонения 0,02 м она равна 0,06 м. При толщине ножа 2,5 мм и ширине 150 мм указанному значению $[\lambda]$ удовлетворяет величина $\delta = 6^\circ$, что подтверждается результатами испытаний корнеподрезчика. При увеличении глубины хода ножа величину δ можно повышать. Для использования в качестве проектного параметра на основании вышеизложенного угол δ в рабочем положении ножа рекомендуется в пределах $5...7^\circ$.

При установке угла δ в пределах $5...7^\circ$ заглубление ножа в почву на заданную величину до 0,15 м (см. таблицу) осуществляется его скольжением параллельно плоскости установки, при этом путь перемещения агрегата составит примерно 1,5 м. С учетом возникающих при заглублении ножа реакций почвы путь заглубления возрастает до 3,0 м, что нецелесообразно с точки зрения эффективности использования площади питомника. Рекомендуемая величина δ для быстрого заглубления плоскорежущих рабочих органов составляет 15° [7], устанавливается регулятором 10 (рис. 2), управляемым из кабины трактора. Силовые параметры процесса резания представлены величиной натяжения полотна ножа.

На рис. 3 представлена схема сил, действующих со стороны ножа на подрезаемый слой почвы (силы трения не указаны). При перемещении нож создает в подрезаемом слое почвы область напряжений, ограниченную векторами R и N . Механика возникновения такой области изучена [2]; граничные векторы отстоят от векторов нормального давления на угол внутреннего трения φ_n .

При движении плоскорежущего рабочего органа в почве верхняя граница области напряжений доходит до поверхности, что наблюдалось в виде ее вспучивания в зоне прохождения ножа.

Со стороны почвы на нож в вертикальной плоскости действует нагрузка, которая складывается из веса почвы, вертикальной составляющей сил трения и силы инерции вследствие скоростного подъема слоя почвы на высоту h_0 . Эта нагрузка распределяется по поверхности полотна, вызывает его прогиб и отклонение от заданной глубины хода, особенно в средней части обрабатываемой полосы. Площадь F_n подрезаемого слоя почвы в вертикальной продольной плоскости, то есть сечение области напряжений, определится по рис. 3.

$$F_n = \frac{h^2}{2} \cdot \operatorname{tg}(\varphi_n + \delta + i) + \frac{2h - B \cdot \sin \delta}{2} \cdot B \cdot \cos \delta + \frac{(h - B \cdot \sin \delta)^2}{2} \cdot \operatorname{tg}(\varphi_n - \delta) - B \cdot b. \quad (2)$$

При составлении модели принято допущение, что сечение ножа в продольной плоскости прямоугольное, при этом погрешность не превышает 1 %. Величина распределенной нагрузки на нож, действующей в вертикальном направлении, определится из выражения

$$q = F_n \cdot \rho \cdot (g + a_1 + g \cdot f \cdot \cos \delta \cdot \sin \delta), \quad (3)$$

где q – нагрузка, приведенная к длине полотна ножа, н/м; ρ – плотность почвы, кг/м³; g – ускорение свободного падения; a_1 – вертикальная составляющая ускорения, которое приобретает слой почвы, находящийся в напряженном состоянии при прохождении ножа; f – коэффициент трения сталь – почва.

Величина a_1 определится из выражения

$$a_1 = \frac{2 \cdot (B \cdot \operatorname{tg} \delta + b) \cdot V^2}{B^2 \cdot \cos \delta}, \quad (4)$$

где V – скорость перемещения ножа, м/с.

Подставляя значения F_n и a_1 , вычисленные из предыдущих выражений, получим значение q , то есть распределенной по длине ножа нагрузки, под действием которой допускается прогиб ножа на величину, допускаемую требованиями к корнеподрезчику, – не более 0,02 м (см. таблицу).

Для контроля за правильностью регулирования натяжения полотна (рис. 2) удобнее использовать не распределенную, а сосредоточенную нагрузку, величина которой для одинакового прогиба ножа в средней его части определится известным выражением [6].

$$Q_c = \frac{q \cdot L}{1,6}, \quad (5)$$

где Q_c – сосредоточенная нагрузка, приложенная к центру ножа, эквивалентная по действию фактической распределенной нагрузке.

Рассмотрим пример расчета контрольной сосредоточенной нагрузки Q_c . Скорость агрегата при горизонтальной подрезке корней [4] устанавливается в диапазоне 1...3 м/с, для условий питомника в качестве верхнего предела примем среднюю величину. Глубину подрезки примем минимальную, $h = 0,08$ м, так как при увеличении длины корней погрешность, связанная с прогибом ножа, будет иметь меньшее агротехническое значение.

Плотность супесчаной почвы при влажности около 12 % равна 1400 кг/м³, $\delta = 6^\circ$, $i = 14^\circ$, остальные параметры – в соответствии с рекомендованными. Угол $\varphi_n = 25^\circ$, коэффициент трения $f = 0,3$ (не более) [7]. Сечение пласта почвы F_n , находящегося в напряженном состоянии, равно 0,0143 м². Вертикальная составляющая $a_1 = 6,71$ м/с². Величина q равна 337 н/м, величина Q_c при максимальной длине ножа 1,2 м составит 253 Н.

Таким образом, чтобы обеспечить устойчивую работу ножа на заданной глубине хода, его полотно должно быть натянуто так, чтобы при установке на его центр груза массой около 26 кг прогиб полотна не превысил величины 0,02 м. Если в качестве контрольного использовать, например, груз массой 16 кг, то контрольный максимальный прогиб составит 0,013 м.

Использование при выращивании посадочного материала в лесных питомниках подрезчика корней горизонтального с научно обоснованными геометрическими и силовыми параметрами позволяет получать крупномерные сеянцы, по качеству соответствующие стандартным саженцам для восстановления леса на вырубках, без существенного увеличения производственных затрат.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- ГОСТ 24835-81. Саженцы деревьев и кустарников. Технические условия. Введ. 1983-01-01. М.: Изд-во стандартов, 1983. 20 с.
- Зима И. М., Малюгин Т. Т. Механизация лесохозяйственных работ. М.: Лесн. пром-сть, 1975. 416 с.
- Корнеподрезчик КНУ-1,2 [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://www.derev-grad.ru/mehanizaciya-i-avtomatizaciya/kornepodrezchik.html>
- Листопад Г. Е., Демилев Г. К., Зоно Б. Д. Сельскохозяйственные и мелиоративные машины. М.: Агроиздат, 1986. 688 с.
- Пат. 2097553 Российская Федерация, М. А 01 В 39/12, А 01 G 23/00. Подрезчик корней растений / А. М. Цыпук, А. Э. Эгипти; заявитель и патентообладатель Петрозаводский гос. ун-т. Оpubл. 10.12.97. Бюл. № 34. 3 с.
- Фесик С. П. Справочник по сопротивлению материалов. Киев: Будивельник, 1982. 280 с.
- Цыпук А. М. Повышение эффективности лесовосстановительных работ ресурсосберегающей технологией: Автореф. дис. ... д-ра техн. наук. Петрозаводск: Изд-во ПетрГУ, 1996. 35 с.

ИРИНА ВЛАДИМИРОВНА ЧЕТВЕРИКОВА

кандидат технических наук, доцент кафедры деталей машин и инженерной графики лесомеханического факультета, Воронежская государственная лесотехническая академия
chivles@rambler.ru

АНАЛИТИЧЕСКИЕ ЗАВИСИМОСТИ ДЛЯ ОБОСНОВАНИЯ УСЛОВИЙ ПЕРЕФОРМИРОВАНИЯ МНОГОРЯДНОГО ПЛОТА

Показано, что установка тормозного щита на секции-линейке многорядного плота позволяет сократить время и путь переформирования плота. Для переформирования плота перед первым этапом буксировщик должен сделать маневр поворота. Приведенные аналитические зависимости позволяют определить установочный параметр и размеры тормозного щита для конкретных условий переформирования при ограниченных значениях времени и пути переформирования плота.

Ключевые слова: многорядный плот, переформирование, секция-линейка, время, путь, момент, угловое ускорение

В настоящее время известно много многорядных плотов, способных переформировываться за счет гидродинамического сопротивления воды без устройства специальных переформировочных рейдов [1], [2], [5]. Они имеют различные конструкции и принципы переформирования, но все обладают достаточно большой скоростью изменения своих габаритов в плане. Одна из таких конструкций представлена на рис. 1. Многорядный плот [4] включает параллельные секции-линейки 1, 2 и 3, скрепленные между собой поперечными связями 4 и соединенные по диагональным углам такелажными скобами 5 и 6. Многорядный плот буксируется по реке катером 7. Тормозной щит 8 может быть установлен на внутренний борт секции 3 при формировании плота или при буксировке перед переформированием.

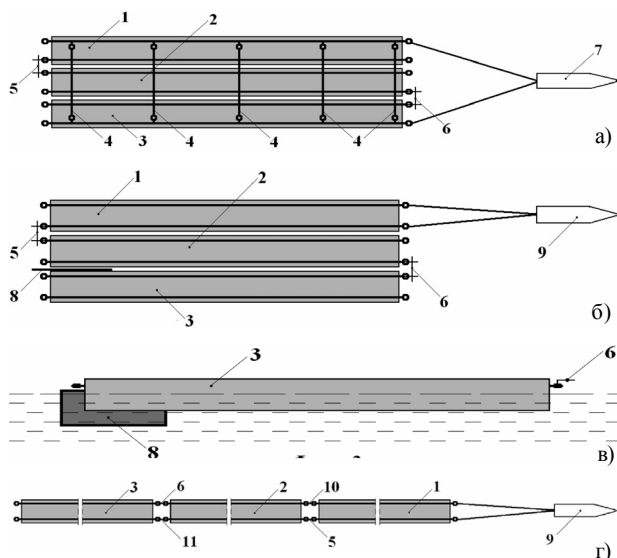


Рис. 1. Многорядный плот [4]:
а – до переформирования, вид сверху;
б – момент начала переформирования, вид сверху;
в – момент начала переформирования, вид сбоку;
г – после переформирования, вид сверху

При установке тормозного щита во время формирования плота необходимо, чтобы минимальная глубина лесосплавного хода удовлетворяла условию

$$h_{\min} \geq T_{\text{щ}} + Z, \quad (1)$$

где $h_{\min}$ – минимальная глубина лесосплавного пути, м; $T_{\text{щ}}$ – осадка щита, м; Z – донный запас, м.

Если условие (1) не выполняется, то тормозной щит устанавливается перед переформированием плота.

Ширина многорядного плота должна быть принята до начала его формирования с учетом минимальной ширины лесосплавного хода и должна удовлетворять условию

$$B_{n \max} < b_{\min}, \quad (2)$$

где $B_{n \max}$ – максимальная ширина плота, м; $b_{\min}$ – минимальная ширина лесосплавного пути, м.

Максимальную ширину плота $B_{n \max}$ следует рассчитывать по формуле

$$B_{n \max} = nB_{c \max} + (n-1)a, \quad (3)$$

где n – количество секций; $B_{c \max}$ – максимальная ширина секции, м; a – расстояние между поперечными рядами секций, м.

Длина секции-линейки плота назначается согласно [3].

Место для переформирования трехрядного плота [5] выбирается так, чтобы во время переформирования крайние точки плота не соприкасались с берегом или дном реки, а также с другими объектами, находящимися на акватории реки, то есть должно выполняться условие

$$b_{\text{ш}} \geq B_{\text{пр}}, \quad (4)$$

где $B_{\text{ш}}$ – безопасная ширина лесосплавного пути, м; $B_{\text{пр}}$ – потребная ширина лесосплавного пути для переформирования плота, м.

Потребная ширина лесосплавного хода B_{np} для переформирования трехрядного плота рассчитывается по формуле

$$B_{np} = B_{c\max} + L_c + l + 2l_3, \quad (5)$$

где L_c – длина секции-линейки, м; l – расстояние между боковой гранью первой секции и торцами двух других секций при их перпендикулярном стоянии по отношению к первой, м; l_3 – запас на переформирование, м.

Переформирование многорядного плота осуществляется в два этапа [1], [5]. После проводки плота через сложные участки реки или при его выводе в море плот освобождается от речного катера (буксира) 7. С секций-линеек 1, 2 и 3 снимают поперечные связи 4, и секция-линейка 1 берется на гак морского буксировщика 9. На первом этапе переформирования при отсутствии поперечных связей 4 секции-линейки 2 и 3 поворачиваются вокруг такелажной скобы 5 в результате гидродинамического воздействия потока воды на борт секции-линейки 2 и дополнительную площадь миделя (тормозной щит 8) борта секции-линейки 3.

Второй этап начинается после поворота секций-линеек 2 и 3 на угол 90° (рис. 2) относительно секции-линейки 1 в результате гидродинамического воздействия потока воды на дополнительную площадь миделя борта секции-линейки 3; секция-линейка 3 поворачивается вокруг такелажной скобы 6 и отодвигается от секции-линейки 2, за счет чего увеличивается гидродинамическое воздействие потока воды на секцию-линейку 3 и многорядный плот быстро устанавливается в один ряд. Секции-линейки дополнительно соединяются такелажными скобами 10 и 11. Тормозной щит 8, создающий дополнительную площадь миделя борта секции-линейки 3, при необходимости может быть демонтирован.

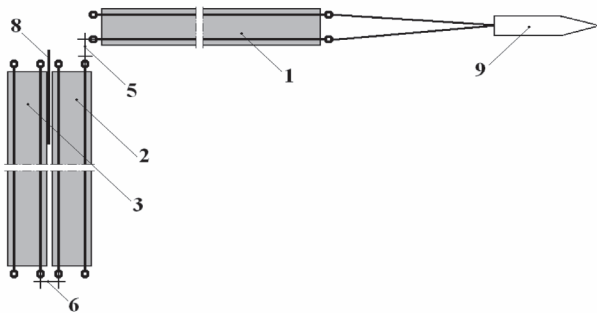


Рис. 2. Многорядный плот во время переформирования

Эффективность переформирования данного многорядного плота повышается за счет создания дополнительной площади миделя на секции-линейке 3 тормозным щитом 8. На рис. 3 представлена схема для расчета дополнительной площади миделя.

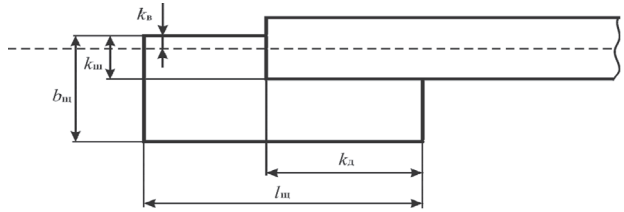


Рис. 3. Расчетная схема площади миделя

Дополнительная площадь миделя $\Omega_{доп}$ составляет

$$\Omega_{доп} = l_{щ} b_{щ} - k_{щ} k_{д} - (l_{щ} - k_{д}) k_{в}, \quad (6)$$

где $l_{щ}$ – длина щита, м; $b_{щ}$ – ширина щита, м; $k_{щ}$ – ширина перекрытия щита секцией, м; $k_{д}$ – длина перекрытия щита секцией, м; $k_{в}$ – высота возвышения щита над поверхностью воды, м.

Дополнительная площадь миделя, рассчитываемая по формуле (6), является максимальной при нахождении щита перпендикулярно оси первой секции плота (рис. 2). Когда тормозной щит находится не перпендикулярно оси первой секции, формула для расчета дополнительной площади миделя $\Omega_{доп}$ имеет вид:

$$\Omega_{доп} = [l_{щ} b_{щ} - k_{щ} k_{д} - (l_{щ} - k_{д}) k_{в}] \sin \varphi, \quad (7)$$

где φ – угол между тормозным щитом и осью первой секции, град.

С учетом выражения (7) общая площадь миделя секции $\Omega_{об}$, обеспечивающая переформирование, будет рассчитываться по формуле

$$\Omega_{об} = [L_c T_{oc} + (l_{щ} b_{щ} - k_{щ} k_{д} - (l_{щ} - k_{д}) k_{в})] \sin \varphi, \quad (8)$$

где T_{oc} – осадка секции, плота, м.

Крутящий момент M , действующий на две секции-линейки 2 и 3 на первом этапе переформирования, равен

$$M = 2J\xi + M_c, \quad (9)$$

где J – момент инерции секции-линейки относительно такелажной скобы 5, $\text{кг} \cdot \text{м}^2$; ξ – угловое ускорение секций-линеек при переформировании, с^{-2} ; M_c – момент сопротивления вращению секций-линеек 2 и 3, $\text{Н} \cdot \text{м}$.

Так как крутящий момент M создается гидродинамическим давлением воды, он зависит от площади миделя, определяемой формулой (8), и расстояний от центров тяжести секции-линейки и тормозного щита до оси первой секции-линейки (плеч сил давления воды, действующих на секции и щит), которые, в свою очередь, являются функциями угла φ . С учетом этого

$$M = [L_c T_{oc} r_c + (l_{щ} b_{щ} - k_{щ} k_{д} - (l_{щ} - k_{д}) k_{в}) r_{щ}] p \sin^2 \varphi, \quad (10)$$

где r_c – расстояние от центра тяжести секции-линейки до такелажной скобы 5, м; $r_{щ}$ – расстояние от центра тяжести щита до такелажной скобы 5,

м; p – давление потока воды, зависящее от скоростей движения плота и течения воды, Па.

При попутном течении величина давления p снижается, а при встречном потоке она возрастает, поэтому при буксировке плота по течению реки скорость движения буксировщика при переформировании должна быть больше скорости течения [4]. Ветровая нагрузка действует аналогично течению реки, но, учитывая незначительную лобовую площадь надводной части по сравнению с погруженной частью, влиянием ветровой нагрузки пренебрегаем.

Дополнительная площадь миделя, согласно выражению (10), увеличивает величину крутящего момента, действующего на секции-линейки при переформировании, на величину

$$\Delta M = (l_{\text{ш}} b_{\text{ш}} - k_{\text{ш}} k_{\text{д}} - (l_{\text{ш}} - k_{\text{д}}) k_{\text{в}}) r_{\text{ш}} p \sin^2 \varphi. \quad (11)$$

Согласно зависимости (9), увеличение площади миделя способствует возрастанию ускорения вращения секций-линеек, а следовательно, сокращению времени и пути первого этапа переформирования.

Для того чтобы процесс переформирования начался, секции-линейки 2 и 3 надо отклонить от оси секции-линейки 1 на некоторый угол, при котором момент, создаваемый гидродинамическим давлением и определяемый по зависимости (10), будет больше момента сопротивления M_c .

$$[L_c T_{oc} r_c + (l_{\text{ш}} b_{\text{ш}} - k_{\text{ш}} k_{\text{д}} - (l_{\text{ш}} - k_{\text{д}}) k_{\text{в}}) r_{\text{ш}}] p \sin^2 \varphi > M_c. \quad (12)$$

Так как $[L_c T_{oc} r_c + (l_{\text{ш}} b_{\text{ш}} - k_{\text{ш}} k_{\text{д}} - (l_{\text{ш}} - k_{\text{д}}) k_{\text{в}}) r_{\text{ш}}] p > 0$ и $\varphi > 0$,

$$\sin \varphi > \sqrt{\frac{M_c}{[L_c T_{oc} r_c + (l_{\text{ш}} b_{\text{ш}} - k_{\text{ш}} k_{\text{д}} - (l_{\text{ш}} - k_{\text{д}}) k_{\text{в}}) r_{\text{ш}}] p}}. \quad (13)$$

Требуемый угол можно установить маневром буксировщика.

Второй этап переформирования состоит в повороте секции-линейки 2 относительно такелажной скобы 5 и секции-линейки 3 относительно такелажной скобы 6. При этом на началь-

ной стадии второго этапа на секцию-линейку 2 действует момент

$$M = L_c T_{oc} r_c p \sin^2 \varphi. \quad (14)$$

На секцию-линейку 3 действует момент

$$M = (l_{\text{ш}} b_{\text{ш}} - k_{\text{ш}} k_{\text{д}} - (l_{\text{ш}} - k_{\text{д}}) k_{\text{в}}) r_{\text{ш}} p \cos^2 \varphi_1, \quad (15)$$

где $r_{\text{ш}1}$ – расстояние от центра тяжести щита до такелажной скобы 6, м; φ_1 – угол между осью секции-линейки 3 и нормалью к секции-линейке 1, то есть к направлению движения плота при переформировании, град.

Этот момент обеспечивает отрыв секции-линейки 3 от секции-линейки 2. По мере удаления секций-линеек 2 и 3 друг от друга на секцию-линейку 3 начинает действовать момент

$$M = [L_c T_{oc} r \sin^2 \varphi + (l_{\text{ш}} b_{\text{ш}} - k_{\text{ш}} k_{\text{д}} - (l_{\text{ш}} - k_{\text{д}}) k_{\text{в}}) r \cos^2 \varphi_1] p. \quad (16)$$

На каждую секцию-линейку будет действовать крутящий момент M :

$$M = J \xi + M_c. \quad (17)$$

Зависимость (17) показывает, что увеличение площади миделя установкой тормозного щита на секции-линейке 3 позволяет сократить время переформирования плота, а следовательно, и путь переформирования.

Основываясь на полученных результатах, можно сделать следующие выводы:

- установка тормозного щита на секции-линейке 3 позволяет сократить время и путь переформирования плота;
- для переформирования плота перед первым этапом буксировщик должен сделать маневр поворота на угол, определяемый зависимостью (13);
- представленные аналитические зависимости позволяют определить установочный параметр и размеры тормозного щита для конкретных условий переформирования при ограниченных значениях времени и пути переформирования плота.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. А. с. 1126523 СССР, МКИ № В 65 G 69/20. Способ переформирования многорядного плота / Л. П. Щеколдин, Ю. А. Тетерин (СССР). № 3613935/27-11; заявл. 01.07.83, опубл. 30.11.84. Бюл. № 44.
2. Васильев В. В. Модернизация многорядного плота // Лес. Наука. Молодежь-2009: Материалы по итогам науч.-исслед. работы молодых ученых ВГЛТА за 2008–2009 годы: В 2 т. Т. 2 / ВГЛТА. Воронеж, 2009. Вып. 8. С. 16–19.
3. Гоник А. А. Плотовой сплав леса. М.: Гослесбуиздат, 1951. 200 с.
4. Овчинников М. М., Михасенко В. И. Обобщенная зависимость для определения пути и времени остановки пучковых плотов на течении // Лесосечные, лесоскладские работы и транспорт леса: Межвуз. сб. науч. тр. / ЛТА. СПб., 1993. С. 51–54.
5. Пат. 89482 РФ, МПК В 63 В 7/04. Многорядный плот / Д. Н. Афоничев, В. В. Васильев, Н. Н. Папонов; заявитель и патентообладатель ВГЛТА. № 2009121210/22; заявл. 03.06.2009; опубл. 10.12.2009. Бюл. № 34.

СЕРГЕЙ ИВАНОВИЧ МОЛЬКОВ

доктор физико-математических наук, доцент кафедры теоретической физики и методики преподавания физики физико-математического факультета, Карельская государственная педагогическая академия
tandem@onego.ru

ВЛИЯНИЕ ПРОЦЕССОВ НА СТЕНКАХ КАПИЛЛЯРА НА ПАРАМЕТРЫ ПЛАЗМЫ ПОЛОЖИТЕЛЬНОГО СТОЛБА РАЗРЯДА НИЗКОГО ДАВЛЕНИЯ

В работе проанализировано влияние эмиссии вторичных электронов, ион-электронной и фотоэмиссии, а также термализации атомов и ионов на стенках капилляра на параметры плазмы положительного столба разряда низкого давления. Рассмотрена роль степени шероховатости поверхности стенки разрядного капилляра в данных процессах.

Ключевые слова: разряд низкого давления, эмиссия электронов, коэффициент аккомодации, степень шероховатости стенки, параметры плазмы

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Параметры плазмы газовых разрядов низкого давления зависят от процессов взаимодействия молекул, атомов, ионов и электронов плазмы со стенкой разрядной камеры [5], [10]. Твердые поверхности могут служить источниками заряженных частиц за счет электронной эмиссии [11]. На стенках происходит рекомбинация плазменных электронов и ионов, осуществляется теплообмен [16], имеют место различные химические реакции. Характер взаимодействия кроме свойств материала стенки существенно зависит и от степени ее шероховатости [12]. Результаты упомянутых работ носят качественный характер. В данной работе количественно рассмотрено влияние процессов на стенках разрядной камеры на параметры плазмы положительного столба разряда низкого давления и влияние на эти параметры степени шероховатости поверхности стенки.

ЭМИССИЯ ЭЛЕКТРОНОВ

Электронная эмиссия включает в себя эмиссию вторичных электронов, ионно-электронную и фотоэмиссию. Вторичная электронная эмиссия описывается коэффициентом вторичной электронной эмиссии. При малых энергиях налетающих электронов (до 50 эВ) в потоке вторичных электронов преобладают истинно вторичные электроны с коэффициентом эмиссии δ и энергиями порядка 1 эВ и упруго отраженные электроны с коэффициентом эмиссии r и энергиями, равными энергиям налетающих электронов. Величины δ и r для гладкой поверхности зависят от материала стенки и энергии налетающих электронов ε [4]. Зависимость от угла падения слабая.

Поведение δ и r в зависимости от ε имеет довольно сложный характер. Однако, учитывая, что плазменные электроны имеют существенный разброс по скоростям, тонкая структура δ

и r не важна. Кроме того, в конечные выражения коэффициенты эмиссии входят под знаком логарифма. Это позволяет для их описания использовать единые аппроксимационные формулы, учитывающие их основные особенности: рост δ начиная с порогового значения ε_i и наличие максимума у r , равного r_m при энергии ε_m . Таким условиям удовлетворяют выражения:

$$\delta = A (\varepsilon - \varepsilon_i)^a, r = 2,718 r_m \frac{\varepsilon}{\varepsilon_m} \exp \left\{ -\frac{\varepsilon}{\varepsilon_m} \right\}, \quad (1)$$

где A , a – постоянные аппроксимации. Используемые нами значения постоянных аппроксимации для диэлектриков, полученные по данным [4], равны: $A = 0,18$, $a = 0,54$, $\varepsilon_i = 4,5$ эВ, $\varepsilon_m = 4$ эВ, $r_m = 0,55$. Для металлов разброс значений постоянных существенно выше. Поэтому для разрядных камер, собранных из изолированных металлических сегментов, соответствующие коэффициенты аппроксимации даны в таблице.

Коэффициенты аппроксимации

	A	a	ε_i , эВ	ε_m , эВ	r_m
<i>Cu</i>	0,044	0,73	6	10	0,13
<i>W</i>	0,036	0,71	5,5	10	0,2
<i>Al</i>	0,016	0,87	5	4	0,14
<i>Ni</i>	0,012	0,92	4	2,5	0,11

Для расчета средних значений $\bar{\delta}$ и $\bar{r}$, получающихся при учете разброса первичных электронов по энергиям и углам падения θ , имеем:

$$\bar{\delta} = \frac{1}{J_e} \int_0^\infty \int_0^{2\pi} \int \delta(\varepsilon, \theta) dJ_e(v, \theta), \quad \bar{r} = \frac{1}{J_e} \int_0^\infty \int_0^{2\pi} \int r(\varepsilon, \theta) dJ_e(v, \theta), \quad (2)$$

где J_e – плотность потока электронов на стенку; $dJ_e(v, \theta)$ – плотность потока электронов со скоростями v в интервале dv , движущихся к стенке в направлении θ в телесном угле $d\Omega = \sin\theta d\theta d\varphi$, φ – азимутальный угол. При максвелловской функции распределения электронов (ФРЭ) по скоростям имеем:

$$dJ_e(v, \theta) = n_e \left(\frac{m}{2\pi T_e} \right)^{3/2} \exp \left\{ -\frac{mv^2}{2T_e} \right\} v^3 dv \cos \theta d\Omega, \\ J_e = n_e \left(\frac{m}{2\pi T_e} \right)^{3/2}, \quad (3)$$

где m , n_e , T_e – масса, концентрация и температура электронов, выраженная здесь и ниже в энергетических единицах. Для ФРЭ, отличной от максвелловской, T_e – эффективная «температура хвоста» функции распределения $-T_e'$, а перед n_e появляется нормировочный множитель ξ (для газов с высоким потенциалом возбуждения резонансных уровней $\xi \approx 1$). Используя выражения (1) по формулам (2), (3), получаем:

$$\bar{\delta} = A \Gamma(1+a) \left(1+a + \frac{\varepsilon_i}{T_e} \right) T_e^a \exp \left\{ -\frac{\varepsilon_i}{T_e} \right\}, \\ \bar{r} = 5,44 \frac{r_m \varepsilon_m^2 T_e}{(\varepsilon_m + T_e)^3}, \quad (4)$$

где $\Gamma(x)$ – гамма-функция. Для диэлектриков имеем:

$$\bar{\delta} = 0,25 \left(1 + \frac{2,9}{T_e} \right) T_e^{0,4} \exp \left\{ -\frac{4,5}{T_e} \right\}, \quad \bar{r} = \frac{47,8 T_e}{(4 + T_e)^3}. \quad (5)$$

Эффективные коэффициенты вторичной эмиссии с поверхности получаем, домножая выражения (4) или (5) на вероятность вылета частицы без вторичных столкновений P_f .

$$\delta_{ef} = P_f \bar{\delta}, \quad \bar{r}_{ef} = P_f \bar{r}, \quad \sigma_{ef} = P_f \bar{\sigma} = P_f (\bar{\delta} + \bar{r}). \quad (6)$$

Эмиссия электронов при взаимодействии со стенкой ионов для условий разряда носит потенциальный характер, так как энергия ионов не превышает 10^3 эВ. В этом случае коэффициенты ион-электронной эмиссии γ слабо зависят от энергии налетающих ионов и их можно считать постоянными. Величина γ растет с ростом энергии ионизации E_a и уменьшается с ростом работы выхода электронов из материала стенки $e\phi$. Для оценки γ можно использовать эмпирическую формулу [14]: $\gamma \approx 0,016(E_a - e\phi)$, где E_a , $e\phi$ выражены в эВ. Величина квантового выхода фотоэффекта Y растет с ростом энергии фотона $h\nu$ и имеет тенденцию к насыщению. Для инертных газов $h\nu \sim 10$ эВ и $Y \sim 10^{-3} \div 10^{-1}$ для различных материалов. С учетом потерь электронов при выходе с шероховатой поверхности имеем: $\gamma_{ef} = P_f \gamma$, $Y_{ef} = P_f Y \approx 510^{-2} P_f$.

Уравнение баланса зарядов на стенке принимает вид: $J_i = J_e - \sigma_{ef} J_e - \gamma_{ef} J_i - Y_{ef} J_\phi$, где J_i , J_e , J_ϕ – плотность потока на стенку ионов, электронов и резонансных фотонов. Учитывая, что $J_\phi/J_i = Q/\beta$, где β – коэффициент ионизации; Q – константа скорости возбуждения резонансных уровней, распадающихся спонтанно [3], и используя (6), получаем:

$$J_e(1 - P_f \bar{\sigma}) = J_i(1 + P_f \gamma_f), \quad \gamma_f = \gamma + 510^{-2} Q/\beta. \quad (7)$$

Плотности потоков на стенку J_e и J_i равны соответственно:

$$J_e = n_g \sqrt{\frac{T_e}{2\pi m}} \exp \left\{ -\frac{e\Delta\phi}{T_e'} \right\}, \quad J_i = n_g \sqrt{\frac{T_e + T_i}{M}} \approx n_g \sqrt{\frac{T_e}{M}},$$

где M – масса атома (иона); n_g – концентрация заряженных частиц на границе плазма – слой. Используя выражение (7) для падения потенциала в пристеночном слое объемного заряда $\Delta\phi$, получаем:

$$\Delta\phi = \frac{T_e'}{e} \ln \left(\frac{1 - P_f \bar{\sigma}}{1 + P_f \gamma_f} \sqrt{\frac{M}{2\pi m}} \right) = \frac{T_e'}{e} \Delta\eta, \quad (8)$$

где T_e' – «температура хвоста» ФРЭ. При максвелловской ФРЭ $T_e' = T_e$.

КОЭФФИЦИЕНТЫ АККОМОДАЦИИ АТОМОВ И ИОНОВ

Теплообмен тяжелых частиц со стенкой характеризуется коэффициентом аккомодации, равным отношению энергии, передаваемой частицей стенке при столкновении, к максимально возможной энергии. Будем использовать для коэффициентов аккомодации аппроксимационную формулу для однократного рассеяния атомов на решетке твердых сфер [2]: $\alpha_0 = 2,4\mu/(1 + \mu)^2$, где $\mu = M/M_w$ – отношение массы частицы газа к массе атома поверхности.

Реальная поверхность является шероховатой, и поэтому часть атомов после отражения испытывают столкновения со стенкой. Учитывая, что после n -го столкновения со стенкой атом либо покидает ее с энергией $\varepsilon_n = 2\alpha_0 T_w + (1 - \alpha_0)\varepsilon_{n-1}$, где ε_{n-1} – энергия после $n-1$ столкновения с вероятностью P_f либо испытывает еще одно столкновение с вероятностью $1 - P_f$ для эффективного коэффициента аккомодации атомов получаем:

$$\alpha_a = \frac{\alpha_0}{\alpha_0 + P_f(1 - \alpha_0)}. \quad (9)$$

Ионы двигаются к стенке в двойном слое объемного заряда по нормали к средней поверхности. Вблизи стенки их траектории несколько искривляются в соответствии с искажением электрического поля вблизи отрицательно заряженной шероховатой поверхности. В отличие от атомов, которые попадают на стенку под всевозможными углами, ионы попадают на стенку под малыми углами θ . Тогда коэффициент аккомодации для такого столкновения равен $1,5\alpha_0$. Считая, что повторные столкновения описываются коэффициентом аккомодации α_0 , и используя такие же, как и при выводе (9), рассуждения для ионов, получаем:

$$\alpha_i = \frac{\alpha_0(1 + 0,5P_f)}{\alpha_0 + P_f(1 - \alpha_0)}. \quad (10)$$

Кинетические энергии атомов после столкновения со стенкой ε_a и после рекомбинации иона на стенке ε'_a определяются уравнениями:

$$\varepsilon_a = 2\alpha_a T_w + (1 - \alpha_a) 2T_a, \quad \varepsilon'_a = 2\alpha_i T_w + (1 - \alpha_i) \varepsilon_{iw}, \quad (11)$$

где T_w – температура стенки; ε_{iw} – кинетическая энергия иона при столкновении со стенкой. Коэффициент 2 в формулах (13) появляется здесь потому, что, в отличие от средней энергии частицы в разряде, равной $3T/2$, средняя энергия, переносимая частицей на поверхность или с поверхности, равна $2T$. Величина ε_{iw} равна сумме кинетической энергии иона на границе плазма – слой $T/2$ [16] и энергии, приобретаемой в слое $e\Delta\varphi = \Delta\eta T'_e$. Тогда для ε_{iw} получаем:

$$\varepsilon_{iw} = 0.5T_e + \Delta\eta T'_e. \quad (12)$$

ХАРАКТЕРИСТИКИ ШЕРОХОВАТОЙ ПОВЕРХНОСТИ

Будем считать, что поверхность описывается случайной функцией $z(x, y)$ с непрерывными производными $z_x = \partial z / \partial x$, $z_y = \partial z / \partial y$, где плоскость xu совпадает со средним уровнем поверхности. Двумерная плотность распределения вероятности случайных величин z_1, z_2 , соответствующих точкам (x_1, y_1) , (x_2, y_2) , имеет вид [2]:

$$f(z_1, z_2) = \frac{1}{2\pi\sigma^2\sqrt{1-\gamma^2}} \exp\left\{-\frac{z_1^2 + z_2^2 - 2\gamma z_1 z_2}{2\sigma^2(1-\gamma^2)}\right\}, \quad (13)$$

где $\gamma = \exp\{-t^2/\rho^2\}$ – функция корреляции высот шероховатости; $t = \sqrt{(x_1 - x_2)^2 + (y_1 - y_2)^2}$ – кажущееся расстояние между точками; σ – среднеквадратичное отклонение z от среднего уровня; ρ – радиус корреляции. При $t > \rho$ случайные величины z_1 и z_2 статистически не связаны.

Рассмотрим две близкие точки (x, y) , $(x + dx, y)$ и (x, y) , $(x + dx, y + dy)$. Используя выражение (13), получаем плотности распределения вероятности случайных величин z_x и z_x, z_y :

$$f_L(z_x) = \frac{\rho}{2\sqrt{\pi}\sigma} \exp\left\{-\frac{\rho^2 z_x^2}{4\sigma^2}\right\},$$

$$f_S(z_x, z_y) = \frac{\rho^2}{4\pi\sigma^2} \exp\left\{-\frac{\rho^2(z_x^2 + z_y^2)}{4\sigma^2}\right\}. \quad (14)$$

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ ШЕРОХОВАТОСТИ

Параметры σ и ρ связаны с непосредственно измеряемыми характеристиками поверхности. В частности, σ определяется классом точности обработки поверхности, а ρ можно связать с отношением истинной площади поверхности к кажущейся Ψ_S , или отношением истинного расстояния на поверхности к кажущемуся Ψ_L , которое определяется по профилограмме.

Очевидно, что Ψ_S и Ψ_L равны соответственно математическому ожиданию величин $dS/dxdy$ и dl/dx , где dS и dl – элементы площади и длины на поверхности, соответствующие элементам $dxdy$ и dx в плоскости xu . Учитывая, что $dS/dxdy = \sqrt{1 + z_x^2 + z_y^2}$, $dl/dx = \sqrt{1 + z_x^2}$ для Ψ_S и Ψ_L , имеем:

$$\Psi_S = \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} \sqrt{1 + z_x^2 + z_y^2} f_S(z_x, z_y) dx dy, \quad \Psi_L = \int_{-\infty}^{+\infty} \sqrt{1 + z_x^2} f_L(z_x) dx.$$

Используя формулы (14) для f_S, f_L и аппроксимируя результаты интегрирования, получаем:

$$\Psi_S \cong \sqrt{1 + \pi P_s^2}, \quad \Psi_L \cong \sqrt{1 + 4P_s^2/\pi}, \quad (15)$$

где $P_s = \sigma/\rho$ – параметр шероховатости реальной поверхности. Эти же параметры можно определить независимо по рассеянию лазерного излучения поверхностью [9].

ВЕРОЯТНОСТЬ ВЫЛЕТА ЧАСТИЦЫ С ШЕРОХОВАТОЙ ПОВЕРХНОСТИ БЕЗ СТОЛКНОВЕНИЙ

Электроны, эмитируемые стенкой, атомы после столкновения со стенкой и атомы, образовавшиеся при рекомбинации ионов, могут испытывать повторные столкновения. При этом коэффициент эмиссии электронов уменьшается, а коэффициент аккомодации атомов растет. Учесть это явление можно, вводя вероятность вылета частицы с шероховатой поверхности без столкновений P_f . Для расчета P_f определим среднеквадратичный тангенс угла наклона поверхности. Используя формулу (14) для f_L , получаем: $\langle z_x^2 \rangle = \int_{-\infty}^{\infty} z_x^2 f_L(z_x) dz_x = 2P_s^2$. Тогда средний угол наклона поверхности относительно плоскости xu θ_f будет приблизительно равен:

$$\theta_f \cong \arctg \sqrt{\langle z_x^2 \rangle} = \arctg \sqrt{2} P_s. \quad (16)$$

Пусть φ – угол рассеяния частицы поверхностью, отсчитываемый от среднего уровня. Считая, что все направления в пределах от 0 до $\pi/2$ равновероятны, для вероятности рассеяния частицы в пределах $d\varphi$ имеем $dP_\varphi = 2d\varphi/\pi$. Введем вероятность вылета частицы под углом φ без повторных столкновений $P(\varphi)$. Очевидно, $P(\varphi) = 0$ при $0 < \varphi < \theta_f$ и $P(\varphi) = 1$ при $\theta_f < \varphi < \pi/2$. Тогда вероятность вылета частицы с поверхности без столкновений будет равна:

$$P_f = \int_0^{\pi/2} P(\varphi) dP_\varphi = \frac{2}{\pi} \arctg \frac{1}{2\sqrt{P_s}}, \quad (17)$$

где для θ_f использована формула (16). На рис. 1 приведена зависимость P_f от P_s , рассчитанная по формуле (17), в сравнении с экспериментальными данными по вероятности вылета электронов с шероховатой поверхности для различных материалов с различной степенью шероховатости [4].

Зависимости P_f от материала не прослеживается. Соответствующие значения, приведенные на рис. 1, определены путем обработки профилограмм поверхностей, полученных с помощью электронного микроскопа с использованием формулы (15) для Ψ_L .

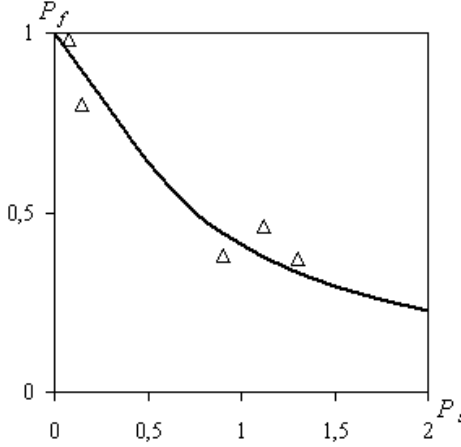


Рис. 1. Зависимость P_f от параметра шероховатости P_s ; Δ – эксперимент; (—) – расчет по формуле (17)

УРАВНЕНИЕ РАВНОВЕСИЯ ПЛАЗМЫ И ТЕМПЕРАТУРА ИОНОВ

Теория квазинейтрального положительного столба разряда низкого давления в продольном магнитном поле с индукцией B в режиме, когда длина свободного пробега ионов сравнима с радиусом капилляра, развита в работе [18]. Уравнение равновесия плазмы, выражающее баланс заряженных частиц, имеет вид:

$$n_a \beta = \frac{S_g(\delta)}{R} \sqrt{\frac{T_e + T_i}{M}}, \quad (18)$$

где T_i – температура ионов; S_g – безразмерная граница плазмы, зависящая от параметра δ :

$$\delta = \frac{Q_{ea}}{4\beta} + \frac{m}{2M} \frac{\omega_e^2}{n_a \beta v_e}, \quad v_e = n_a Q_{ea} + \bar{n}_e Q_{ei} - \text{эффективная}$$

частота столкновений электронов с атомами и ионами; Q_{ea} , Q_{ei} , Q_{ia} – транспортные константы скоростей столкновений электронов с атомами и ионами и ионов с атомами; $\omega = eB/m$ – электронная гирочастота; чертой здесь и ниже обозначается усреднение по сечению разряда. Аппроксимируя результаты [18] для S_g , получаем: $S_g = 1,092(1 + 0,142\delta)^{-1/2}$. Когда длина свободного пробега ионов $\lambda_i \ll R$ (режим амбиполярной диффузии, δ велико), уравнение равновесия (18) соответствует результатам теории Шоттки. В случае $\lambda_i \gg R$ при отсутствии магнитного поля ($\delta = 0$) уравнение (18) совпадает с уравнением равновесия плазмы Тонкса – Ленгмюра.

ФР ионов по скоростям в разрядах низкого давления существенно анизотропна. Продольная температура ионов $T_{||}$ близка к температуре

атомов, а поперечная $T_{\perp}$ существенно превышает T_a , что связано с высокой радиальной скоростью ионов, которая на границе плазмы и пристеночного слоя объемного заряда достигает величины $\sqrt{T_e/M}$. В случае свободного падения ионов на стенку: $T_{\perp} = 0,56T_a + 0,13T_e$ [6], или $T_{\perp} = 0,64T_a + 0,118T_e$ [6]. В общем случае ($\lambda_i \sim R$); используя распределение радиальных скоростей ионов [18] и метод, аналогичный изложенному в [6], получаем аппроксимационную формулу для $T_{\perp}$:

$$T_{\perp} = [1 - 0,34S_g^2(\delta)]T_a + 0,094S_g^2(\delta)T_e, \quad (19)$$

которая при $\lambda_i \gg R$ согласуется с результатами [6], [7], а при $\lambda_i \ll R$ дает $T_{\perp} \approx T_a$. Эффективная температура ионов равна: $T_{\perp} \approx T_a$.

$$T_i = (T_{||} + 2T_{\perp})/3. \quad (20)$$

ФУНКЦИЯ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ЭЛЕКТРОНОВ ПО ЭНЕРГИЯМ И КОНСТАНТЫ СКОРОСТЕЙ ПРОЦЕССОВ

На практике используют разряды двух типов: слаботочные тлеющие, где концентрации электронов $n_e \sim 10^9 - 10^{11} \text{ см}^{-3}$, и сильноточные с накалимым катодом, где $n_e \sim 10^{13} - 10^{14} \text{ см}^{-3}$. В последнем случае вследствие интенсивных межэлектронных столкновений ФРЭ близка к максвелловской, тогда как в слаботочных разрядах она «на хвосте» обеднена из-за процессов возбуждения, ионизации и ухода быстрых электронов на стенку. Кроме того, длина релаксации ФР по энергии сравнима с R , что приводит к нелокальности ФРЭ [17].

При расчете нелокальной ФРЭ в кинетическом уравнении (КУ) необходимо сохранить члены, описывающие поперечную неоднородность плазмы [17]. Каждый акт ионизации сопровождается уходом одного быстрого электрона на стенку, и эти процессы разделены в пространстве. Для приближенного учета явления нелокальности заменим поперечные члены в КУ, описывающие радиальное движение электронов, добавкой в интеграле столкновений к частоте неупругих столкновений v_{in} частоты ухода быстрых электронов на стенку v_w , равной частоте ионизации v_i . Таким образом, вместо $v_{in} = v_{ex} + v_i$, где v_{ex} – частота возбуждения, используем $v'_{in} = v_{ex} + 2v_i$. При этом изотропная часть ФРЭ, полученная по методу [3], ведет к изменению константы скорости возбуждения и коэффициента ионизации на фактор F , а температуры «хвоста» ФР T_e на фактор D :

$$Q = Q(T_e)F, \quad \beta = \beta(T_e)F, \quad T'_e = T_e D, \quad (21)$$

где

$$F = \frac{1}{C} \frac{\sqrt{1+4C} - 1}{\sqrt{1+4C} + 1}, \quad D = \frac{2}{\sqrt{1+4C} + 1}, \quad C = \frac{v_{in}}{v_{ee}} = \frac{n_a [Q_{ex}(T_e) + 2\beta(T_e)]}{\bar{v}_{ee}},$$

$Q(T_e)$, $\beta(T_e)$ – соответствующие константы при максвелловской функции распределения с эф-

эффективной температуры T_e ; $\bar{\nu}_{ee}$ – частота меж-электронных столкновений с энергией, превышающей пороговую для возбуждения.

ЗАКОН ОМА И БАЛАНС ДАВЛЕНИЯ

Для сильноточного разряда необходимо учитывать торможение электронной компоненты при упругих столкновениях с ионами и вытеснение нейтрального газа электронами и ионами.

$$\bar{j} = \frac{eE_z}{m} \frac{\bar{n}_e}{n_a Q_{ea} + \bar{n}_e Q_{ei}}, \quad p = n_a T_a + \bar{n}_e (T_e + T_i), \quad (22)$$

где $\bar{j}$, p – средняя по сечению плотность тока и давление наполнения; E_z – напряженность продольного электрического поля. В слаботочном разряде можно положить $n_e = 0$. В уравнении баланса давления пренебрегалось небольшим нетепловым вытеснением нейтрального газа из капилляра вследствие явления электрофореза и температурной транспирации. В сильноточных разрядах электрофорез компенсируется с помощью обводного канала, соединяющего катодный и анодный узлы разрядной трубки.

ТЕМПЕРАТУРА АТОМОВ И БАЛАНС ЭНЕРГИИ В РАЗРЯДЕ

В слаботочных разрядах температура атомов соответствует температуре стенки. В сильноточных разрядах температура атомов достигает нескольких тысяч градусов Кельвина. Уравнение баланса энергии атомов запишем в интегральной форме:

$$2\pi R J_a 2\alpha_a (T_a - T_w) = \pi R^2 \bar{n}_e n_a \left[\frac{1}{2} Q_{ia} \frac{3}{2} (T_i - T_a) + \right. \\ \left. + \frac{2m}{M} Q_{ea} \frac{3}{2} (T_e - T_a) + \beta \left(\epsilon'_a - \frac{3}{2} T_a \right) \right],$$

где $J_a = n_a \sqrt{T_a / 2\pi M}$ – плотность потока атомов на стенку. Левая часть данного уравнения описывает теплообмен атомов со стенкой, первый и второй члены правой части – обмен при столкновениях с ионами и электронами, третий член учитывает, что каждый акт ионизации ведет к появлению атома на стенке с энергией ϵ'_a и к «исчезновению» атома в разряде с энергией $3T_a/2$.

$$T_a = T_w + \frac{S_g}{\alpha_a} \frac{\bar{n}_e}{n_a} \sqrt{\frac{\pi T_e}{8 T_a}} \left[2\alpha_i T_w + (1 - \alpha_i) \epsilon_{iw} - \frac{3}{2} T_a \right] \cong \\ \cong T_w + S_g \frac{\bar{n}_e}{n_a} \sqrt{\frac{\pi T_e}{8 T_a}} \frac{1 - \alpha_i}{\alpha_a} \epsilon_{iw}. \quad (23)$$

В слаботочных разрядах $\bar{n}_e / n_a \sim 10^{-7} - 10^{-6}$ и $T_a \cong T_w$. В сильноточных разрядах $\bar{n}_e / n_a \sim 10^{-2} - 10^{-1}$ и $T \gg T_w$.

Уравнение баланса энергии в разряде в интегральной форме имеет вид:

$$\pi R^2 \bar{j} E_z = 2\pi R \left\{ J_i [E_a + \alpha_i (\epsilon_{iw} - 2T_w)] - P_f \gamma \epsilon_\gamma \right\} +$$

$$+ J_e [2T_e' - P_f (\bar{\nu} \epsilon_r + \delta \epsilon_\delta)] +$$

$$+ J_a 2\alpha_a (T_a - T_w) + J_\phi (E_\phi - 5 \cdot 10^{-2} P_f \epsilon_\phi) \},$$

где E – энергия резонансных фотонов; $\epsilon_r = 2T_e$, $\epsilon_\delta \sim 1.5B$, $\epsilon_\gamma = 0.5(E_a - e\phi)$, $\epsilon_\phi = 0.5(E_\phi - e\phi)$ – средние кинетические энергии вторичных электронов: упруго отраженных, истинно вторичных, образующихся при ион-электронной эмиссии и при фотоэффекте. Используя выражения для плотностей потоков частиц на стенку и формулу (23), получаем:

$$\bar{j} E_z = \bar{n}_e \frac{S_g}{R} \sqrt{\frac{T_e}{M_a}} \left\{ E_a + \epsilon_{iw} - \frac{3}{2} T_a - P_f \gamma \epsilon_\gamma + \right. \\ \left. + \frac{1 + P_f \gamma_f}{1 - P_f \bar{\sigma}} [2T_e' - P_f (\bar{\nu} \epsilon_r + \delta \epsilon_\delta)] + \frac{Q_\phi}{\beta} (E_\phi - 5 \cdot 10^{-2} P_f \epsilon_\phi) \right\}. \quad (24)$$

АПРОБАЦИЯ РЕЗУЛЬТАТОВ

Анализ системы уравнений (18, 19, 20, 22, 23, 24) показывает, что для разрядов низкого давления справедлив приближенный закон подобия, согласно которому при R -преобразовании внутренние инварианты $n_e R$, $n_a R$, T_e , T_a , T_i , $E_z R$ остаются неизменными, если сохраняются внешние инварианты p , jR , BR , а также материал стенки и технология его обработки.

Отклонение от закона подобия связано с зависимостью коэффициента ступенчатой ионизации от концентрации электронов, а не от произведения $n_e R$. Наиболее ярко зависимость внутренних параметров плазмы от свойств материала стенки и степени ее шероховатости P_s проявляется для сильноточных разрядов.

На рис. 2 представлены зависимости $n_e R$ и T_e от α_a и σ_{ef} , а также от связанного с ними параметра шероховатости R_s для разряда в капилляре из бериллиевой керамики ($\alpha_0 = 0.44$, $\gamma = 0.17$, для охлаждаемой стенки $T_w \cong 320$ K $\cong 0.027$ эВ). При расчетах использовались данные о сечениях процессов, собранные в [13], а при расчете коэффициентов прямой и ступенчатой ионизации β_r , β_{st} ($\beta_r = \beta_r + \beta_{st}$), и констант скоростей Q_{ex} , Q_ϕ – методика [3]. С ростом P_s или α_a величина T_e уменьшается, а $n_e R$ растет. Это обусловлено ростом эффективности теплообмена со стенкой, уменьшением атомной температуры и увеличением концентрации атомов в разряде. При этом температура электронов должна уменьшаться, а для поддержания неизменности тока разряда их концентрация должна возрасти.

С ростом степени шероховатости будет одновременно изменяться величина σ_{ef} . Однако предыдущий вывод остается в силе, так как коэффициент вторичной электронной эмиссии в силу ухудшения условий выхода электронов с поверхности будет уменьшаться, а, как показано на рис. 2б, параметры T_e и $n_e R$ при этом имеют тенденцию к насыщению. Одновременно существенно расширяется область стабильного горения

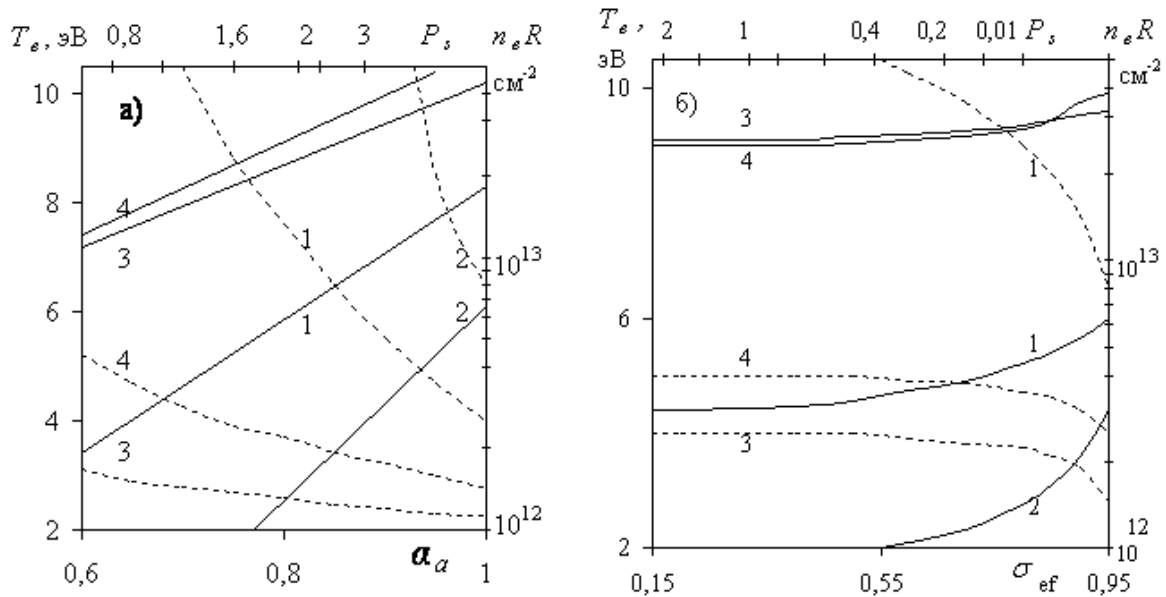


Рис. 2. Зависимости T_e (---) и $n_e R$ (—) от α_a при $\sigma_{ef} = 0,8$ (а) и от σ_{ef} при $\alpha_a = 0,9$ (б); $pR = 0,06$ Торсм, $jR = 50$ Асм⁻¹ (1), 100 (2); $pR = 0,2$, $jR = 50$ (3), 100 (4)

разряда по току, так как обрыв разряда, обусловленный вытеснением нейтрального газа из капилляра, происходит при больших токах [8].

При данных значениях pR и BR величина $n_e R$ с ростом jR уменьшается вследствие разогрева нейтрального газа и его вытеснения электронами, а электронная температура растет. Это приводит при некотором критическом значении $(jR)_{cr}$ к нарушению равновесия между частотой ухода ионов на стенку, неограниченно растущей с ростом электронной температуры

$\nu_{iw} = (S_g/R) \sqrt{(T_e + T_i)/M}$, и частотой ионизации $n_a \beta$, ограниченной в силу уменьшения $n_a R$ и насыщения β , и к обрыву разряда. Для расчета $(jR)_{cr}$ необходимо к рассмотренной системе уравнений добавить условие $(\partial jR / \partial T)_{pR, BR} = 0$. На рис. 3 представлены зависимости $n_e R$ от jR и $(jR)_{cr}$ от pR в сравнении с экспериментальными данными.

Отметим, что вблизи обрыва разряда возбуждаются плазменные неустойчивости [8], [1], что, по-видимому, приводит к превышению расчетных значений над данными эксперимента.

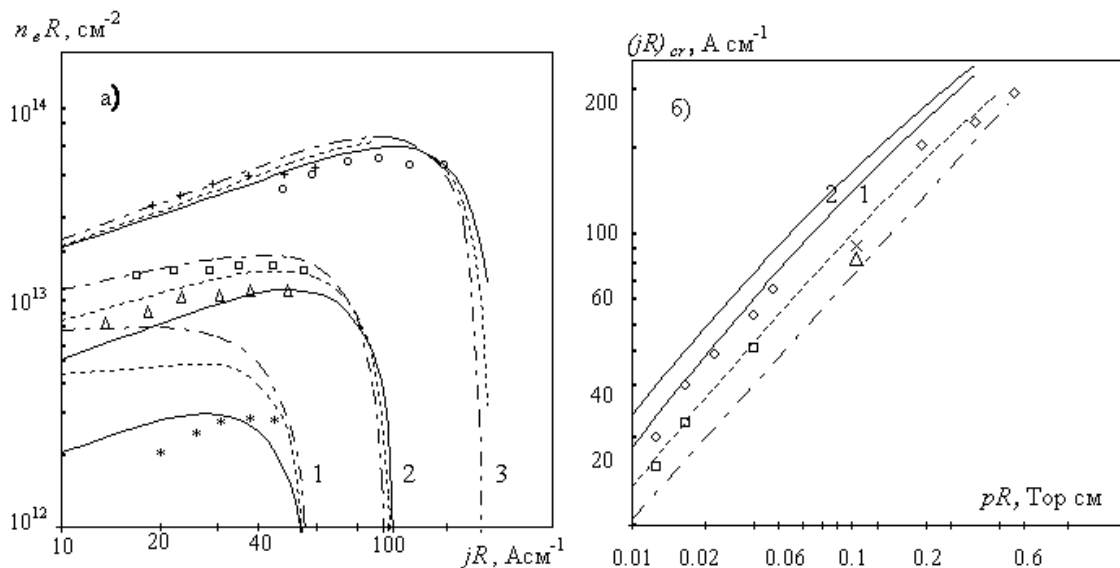


Рис. 3. Зависимости $n_e R$ от jR (а) при $pR = 0,03$ Торсм (1), 0,1 (2), 0,4 (3); (—) $BR = 0$, (---) 10^{-2} Тсмм⁻¹, (---) $2 \cdot 10^{-2}$; эксперимент: * — $pR = 0,03$ Торсм, $BR = 0$; + — 0,4, 0; □ — 0,11, 0; ○ — 0,38, 0; △ — 0,06, 0 [10]. Зависимости $(jR)_{cr}$ от pR (б) при $P_s = 3$ (1), $BR = 0,10^{-2}$ Тсмм, $2 \cdot 10^{-2}$; при $P_s = 4$, $BR = 0$ (2). Эксперимент: ○ — $BR = 0$; □ — $BR = 0,6 \cdot 10^{-2}$ Тсмм; × — $BR = 1,5 \cdot 10^{-2}$ Тсмм [8]; △ — $BR = 1,7 \cdot 10^{-2}$ Тсмм; ◇ — $BR = 0$ [1]

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Из приведенных данных следует однозначный вывод: при расчетах параметров плазмы разрядов низкого давления необходимо учитывать процессы на стенках разрядного капилляра. Отметим, что аналогичные явления имеют место в многочисленных исследованиях последнего времени, касающихся пылевой плазмы [15]. Так, при расчете зарядки пылевых частиц необ-

ходимо учитывать эмиссию вторичных электронов, ион-электронную и фотоэмиссию. Кроме того, разогрев пылевых частиц при бомбардировке их ионами и последующей рекомбинации с электронами приводит к термоэмиссии электронов. При теоретическом анализе этих процессов также могут быть использованы полученные в данной работе результаты для коэффициентов эмиссии.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Алферов Г. Н., Донин В. И., Смирнов Г. И. О неустойчивости плазмы ионных лазеров // Квантовая электроника. 1981. Т. 6. № 1. С. 13–19.
2. Баранцев Р. Г. Взаимодействие разряженных газов с обтекаемыми поверхностями. М.: Наука, 1975. 343 с.
3. Биберман Л. М., Воробьев В. С., Якубов И. Т. Кинетика неравновесной низкотемпературной плазмы. М.: Наука, 1982. 376 с.
4. Бронштейн И. М., Фрайман Б. С. Вторичная электронная эмиссия. М.: Наука, 1969. 407 с.
5. Елагин В. В., Лукин А. Я., Фотиади А. Э. О влиянии процессов на стенках разрядной трубки ионных лазеров на их выходные характеристики // Труды ЛПИ. 1985. № 412. С. 70–72.
6. Захаров П. Н., Пекар Ю. А. О радиальной функции распределения ионов в разряде низкого давления // ЖТФ. 1970. Т. 40. № 8. С. 1664–1668.
7. Захарова В. М., Каган Ю. М. О движении ионов и атомов в плазме // Спектроскопия газоразрядной плазмы. Л.: Наука, 1970. С. 291–318.
8. Кирсанов А. В., Мольков С. И. Устойчивость существования положительного столба сильноточного разряда низкого давления в продольном магнитном поле // Материалы VI Всесоюзной конференции по физике плазмы. Л., 1983. С. 434–437.
9. Мольков С. И. Влияние шероховатости поверхности стенок разрядной камеры на работу газоразрядных лазеров // Лазеры, измерения, информация. СПб.: Изд-во СППУ, 2010. Т. 1. С. 14–25.
10. Мольков С. И., Степанов В. А. Расчет параметров плазмы разряда низкого давления с учетом элементарных процессов на поверхности стенок разрядной трубки // Электронная техника. Сер. 4. Вып. 4. 1986. С. 15–22.
11. Привалов В. Е. О виртуальных катодах в разряде газового лазера // Оптика и спектроскопия. 1994. Т. 77. № 2. С. 307.
12. Привалов В. Е., Фридрихов С. А., Шишкин Г. А. Экспериментальное исследование реактивных колебаний в разрядном промежутке He-Ne лазера // Оптика и спектроскопия. 1974. Т. XXXIV. № 5. С. 982–986.
13. Райзер Ю. П. Основы современной физики газоразрядных процессов. М.: Наука, 1980. 415 с.
14. Фоменко В. С., Подчерняева И. А. Эмиссионные и адсорбционные свойства веществ и материалов. М.: Атомиздат, 1975. 147 с.
15. Фортов В. Е., Храпак А. Г., Храпак С. А., Молотков В. И., Петров О. Ф. Пылевая плазма // Успехи физических наук. 2004. Т. 174. № 5. С. 494–544.
16. Цендин Л. Д. Переход плазмы низкого давления в высокоионизованное состояние // ЖТФ. 1973. Т. 43. № 8. С. 1595–1602.
17. Цендин Л. Д. Нелокальная кинетика электронов в газоразрядной плазме // Успехи физических наук. 2010. Т. 180. № 2. С. 139–164.
18. Forrest J. R., Franklin R. N. The Positive Column in a Magnetic Field at Low Pressures: the Transition from Free-Fall to Ambipolar Conditions // British J. Appl. Phys. 1966. Vol. 17. № 12. P. 1569–1574.

ВАЛЕРИЙ ИВАНОВИЧ СЫСУН

доктор физико-математических наук, профессор кафедры
электроэнергетики и электроники физико-технического фа-
культета, Петрозаводский государственный университет
vsysun@psu.karelia.ru

ВЛАДИМИР СТАНИСЛАВОВИЧ ИГНАХИН

аспирант кафедры электроники и электроэнергетики фи-
зико-технического факультета, Петрозаводский государ-
ственный университет
art101@mail.ru

К РАДИАЛЬНОЙ ТЕОРИИ ИОННОГО ТОКА НА ЗОНД: II. УЧЕТ ОБЪЕМНОЙ ИОНИЗАЦИИ ПРИ НАЛИЧИИ СТОЛКНОВЕНИЙ С АТОМАМИ

В настоящей работе рассматривается ионный ток на сферический и цилиндрический зонды с учетом ионизации и столкновений с атомами в области возмущения плазмы. В предположении нулевой температуры ионов (приближение радиального дрейфа) получено выражение для концентрации ионов. Вычислены вольт-амперные характеристики зондов для широкого диапазона параметров (размер зонда, частота ионизации, длина свободного пробега ионов). Получены аппроксимирующие выражения для вольт-амперных характеристик в предельных случаях большого (плоского) и малого зонда.

Ключевые слова: зондовая диагностика, плазма низкого давления, радиальная теория, область возмущения, объемная ионизация

ВВЕДЕНИЕ

Радиальная теория ионного тока на зонд в плазме низкого давления впервые предложена в работе [7] и развивалась в последующем [8], [12], [16], [14]. Приближение радиального дрейфа наиболее применимо в случае, когда ионная температура T_i близка к нулю и выполняется приближение бесстолкновительного движения. При этом даже редкие столкновения ионов с атомами разрушают орбитальное движение частиц и сильно влияют на величину ионного тока [6], [1]. Вследствие этого радиальная теория дает лучший результат при наличии редких столкновений, чем более строгая орбитальная теория [10], [15]. В случае же частых столкновений радиальная теория дает завышенное значение величины ионного тока.

В радиальной теории пренебрегается орбитальным моментом ионов (полагается T_i / T_e , где T_e – температура электронов), которые движутся радиально со скоростями, определяемыми локальным потенциалом и законом сохранения энергии. В этом случае возможно численное решение уравнения Пуассона без разбиения на области квазинейтральной плазмы и слоя [7]. Ионный ток задается на бесконечности, а ионизацией в объеме пренебрегается. Концентрация электронов предполагается распределенной по больцмановскому закону $n_e = n_0 \exp(\frac{e\varphi}{kT_e})$, где n_0 – концентрация невозмущенной плазмы. Уравнение Пуассона соответственно для цилиндрического и сферического случая запишется:

$$\frac{1}{r} \frac{d}{dr} \left(r \frac{d\varphi}{dr} \right) = - \frac{e}{\varepsilon_0} \left[\frac{I_z}{2\pi l_z e \sqrt{-2e\varphi/M}} - n_0 \exp\left(\frac{e\varphi}{kT_e}\right) \right], \quad (1)$$

$$\frac{1}{r^2} \frac{d}{dr} \left(r^2 \frac{d\varphi}{dr} \right) = - \frac{e}{\varepsilon_0} \left[\frac{I_z}{4\pi r^2 e \sqrt{-2e\varphi/M}} - n_0 \exp\left(\frac{e\varphi}{kT_e}\right) \right]. \quad (2)$$

При заданном ионном токе I_z эти уравнения интегрировались численно [2], [3] при граничных условиях: $r \rightarrow \infty$, $n \rightarrow n_0$, $\varphi \rightarrow 0$, $d\varphi/dr \rightarrow 0$ для отношений радиуса зондов к электронному дебаевскому радиусу $\frac{r_z}{\lambda_D} \geq 0,25$ – цилиндр и $\frac{r_z}{\lambda_D} \geq 0,05$ – сфера. В [14] рассчитывался плавающий потенциал сферического зонда в широком диапазоне $10^{-4} \leq \frac{r_z}{\lambda_D} \leq 10^4$ для аргона и гелия, но вольт-амперные характеристики не рассчитывались.

Учет столкновений в радиальной теории при низких и промежуточных давлениях проведен в работе [3]. После столкновения в точке r' ионы стартуют с нулевой скоростью и движутся чис-

то радиально со скоростью $v_i = \sqrt{\frac{2e|\varphi(r) - \varphi(r')|}{M}}$.

Вероятность того, что ион, испытавший столкновение в точке r' , дойдет до точки r без рассеяния, определяется экспонентой $\exp(-\frac{(r'-r)}{\lambda_i})$, где λ_i – длина пробега иона. Концентрация определяется путем деления потока ионов на их скорость и интегрированием по всем точкам рассеяния r' :

$$n_i = \frac{j_z r_z^\alpha}{e \lambda_i r^\alpha} \int_r^\infty \frac{\exp(-\frac{(r'-r)}{\lambda_i}) dr'}{\sqrt{2e(\varphi(r') - \varphi(r))/M}}, \quad (3)$$

где j_z – плотность тока на зонд, $\alpha = 0$ – плоский случай, $\alpha = 1$ – цилиндрический случай, $\alpha = 2$ – сферический случай.

Приравниванием концентрацию ионов (3) к концентрации электронов, распределенной по бoльцмановскому закону, в [3] получено уравнение, связывающее потенциал, концентрацию в невозмущенной области и ионный ток. Численное решение начиналось на больших расстояниях с аналитического решения $\varphi(r') - \varphi(r) = E \cdot (r' - r)$, $E = j / en\mu_i$, где μ_i – подвижность ионов.

Вторая граница (радиус слоя) определялась обращением $\frac{d\varphi}{dr}$ в бесконечность.

Ограничением результатов работы [3] является приближение квазинейтральности, а также, как и в [7], [8], [12], отсутствие учета ионизации в объеме, что требует задания ионного тока на бесконечности. Иначе без ионизации вся плазма конечных размеров уйдет на зонд.

Ионизация в объеме учитывается в работах по пристеночному потенциалу, когда стенка интерпретируется как большой зонд. В основополагающей работе Тонкса и Ленгмюра [17] получено уравнение «плазма-слой»:

$$\nabla^2 \varphi = -\frac{e}{\varepsilon_0} \left\{ \frac{z}{r^\alpha} \int_0^r \frac{r'^\alpha n_0 \exp\left(\frac{e\varphi(r')}{kT_e}\right) dr'}{\sqrt{2e(\varphi(r') - \varphi(r)) / M}} - n_0 \exp\left(\frac{e\varphi(r)}{kT_e}\right) \right\}, \quad (4)$$

здесь z – частота ионизации, производимой одним электроном, $\frac{r'^\alpha}{r^\alpha} z n_e(r') dr'$ – плотность потока ионов в r , образовавшихся в элементе dr' .

Численные расчеты выполнены для области квазинейтральной плазмы, где принималось $n_i = n_e$. Результаты [17] показали, что учет генерации ионов приводит к возрастанию потенциала и средней скорости ионов на границе плазмы и уменьшению ионного тока на слой. Это отклонение от случая отсутствия генерации при внешней стенке возрастает с переходом от плоской к цилиндрической и далее к сферической геометрии. Впоследствии результаты [17] уточнялись в [13], [9], [11].

В [5] рассмотрен учет объемной ионизации в радиальной теории при конечной области возмущения плазмы " r_0 ". Применено уравнение «плазма-слой» Ленгмюра (3) для ионного тока, но с обратными граничными условиями: на внешней границе $r = r_0$ принималось $\varphi = 0$, $\frac{d\varphi}{dr} = 0$.

В работе определяли зависимость плавающего потенциала зонда (пылевой частицы в плазме) и связанного с ней значения r_0 / λ_D от частоты ионизации. Столкновения с атомами не учитывались.

Отсутствие учета объемной ионизации в существующих на сегодняшний день теориях ионного тока на зонд в плазме низкого давления требует увеличения области возмущения до бесконечности, в противном случае вся плазма конечных размеров уйдет на зонд. Помимо влияния на ионный ток, конечное значение области

возмущения плазмы зондом определяет пространственное разрешение метода. Пространственное разрешение часто является принципиально важным моментом и тесно связано с вопросом возможности или невозможности применения данного метода вообще. В связи с этим актуальной задачей является анализ влияния ионизации на ионный ток на зонд в плазме низкого давления.

В настоящей работе рассматривается ионный ток на сферический и цилиндрический зонды с учетом ионизации в приближении холодных ионов. Вычислены вольт-амперные характеристики для безразмерных параметров $r_3 / \lambda_D = 0,0001 \div 10$, $A = z / \omega_i = 0,02 \div 5$, $\lambda_i / \lambda_D = 0,01 \div \infty$, где ω_i – ионная плазменная частота.

ИСХОДНЫЕ УРАВНЕНИЯ И АЛГОРИТМЫ РАСЧЕТА

Пусть r_0 – область возмущения плазмы. В [2], [4] область возмущения определяется объемом плазмы вокруг зонда, в котором при пренебрежении объемной рекомбинацией число образующихся в единицу времени ионов за счет ионизации равно току на зонд. В приближении радиального движения это определение соответствует нулевой дрейфовой скорости ионов на границе области возмущения. В единице объема за единицу времени образуется $n_e z$ ионов. Все ионы, поступающие на зонд, создаются внутри r_0 . Ионы, образовавшиеся вне r_0 , уходят на стенку и электроды. Этот уход и определяет частоту ионизации, производимую одним электроном, $z \sim \frac{j_{cm} s_{cm}}{N}$, где N – полное число электронов в объеме, j_{cm} , s_{cm} – плотность ионного тока на стенку и площадь стенки.

Рассмотрим формирование потока ионов на зонд внутри r_0 . На элементе пути иона dr' образуется доля новой плотности тока:

$$dj = en_e(r') z dr' + \frac{j dr'}{\lambda_i}. \quad (5)$$

Вероятность столкновения пропорциональна $\frac{dr'}{\lambda_i}$, вероятность пройти путь r есть $\exp(-\frac{r}{\lambda_i})$.

Тогда до точки r от этой плотности тока дойдет

$$dj \exp\left[-\frac{(r'-r)}{\lambda_i}\right] \frac{r'^\alpha}{r^\alpha}. \quad (6)$$

Соотношения (5), (6) удовлетворяют условию сохранения потока:

$$j(r) = \int_r^{r_0} \frac{r'^\alpha}{r^\alpha} \exp\left[-\frac{(r'-r)}{\lambda_i}\right] dj = e \int_r^{r_0} \frac{r'^\alpha}{r^\alpha} n_e(r') z dr'. \quad (7)$$

Все ионы доли тока (6) будут иметь скорость $\sqrt{\frac{2e}{M} [\varphi(r') - \varphi(r)]}$. Разделив долю потока на скорость, получим долю концентрации d'_n . Полная концентрация в r будет равна

$$n(r) = \frac{1}{r^\alpha} \int_r^{r_0} \frac{r'^\alpha [n_e(r')z + \frac{j(r')}{e\lambda_i}] \exp\left[-\frac{(r'-r)}{\lambda_i}\right] dr'}{\sqrt{\frac{2e}{M}[\phi(r') - \phi(r)]}}, \quad (8)$$

$$\text{где } j(r') = \frac{e}{r'^\alpha} \int_{r'}^{r_0} n_e(r'') z r''^{\alpha} dr''.$$

Введем безразмерные параметры:

$$x = \frac{r}{\lambda_0} = \frac{re}{\sqrt{\varepsilon_0 k T_e / n_0}}; \quad U = \frac{e\phi}{k T_e}; \quad n' = \frac{n}{n_0}; \quad l_i = \frac{\lambda_i}{\lambda_0};$$

$$A = \frac{z\lambda_0}{\sqrt{k T_e / M}} = \frac{z}{\omega_i}; \quad j' = \frac{j}{en_0 \sqrt{k T_e / M}}; \quad \text{здесь } \omega_i -$$

плазменная ионная частота, j – плотность тока, λ_0 – электронный дебаевский радиус.

Подставляя выражение (8) в уравнение Пуассона при больцмановском распределении концентрации электронов, получим в безразмерных величинах:

$$\frac{\partial^2 U}{\partial x^2} + \frac{\alpha}{x} \frac{\partial U}{\partial x} = \exp(U(x)) - \frac{A}{x^\alpha} \int_x^{x_0} \frac{[x'^\alpha \exp(U(x')) + \frac{1}{l_i} \int_{x'}^{x_0} \exp(U(x'')) x''^{\alpha} dx''] \exp\left[-\frac{(x'-x)}{l_i}\right] dx'}{\sqrt{2[U(x') - U(x)]}}. \quad (9)$$

Решение (9) от границы области возмущения затруднено нулевыми начальными условиями для потенциала и его градиента. В [5] для начального от границы тонкого слоя, считающегося плоским, $\Delta x \ll x_0 = x_N$ получено приближенное аналитическое решение в предположении $n'_e = 1$; $n'_N = \text{const}$:

$$U(x) = (1 - n'_N) \frac{(x_N - x)^2}{2}, \quad (10)$$

$$n'_N = \frac{1}{3} + \sqrt[3]{\frac{1}{27} + \frac{B}{2}} + \sqrt{\frac{B}{27} + \frac{B^2}{4}} + \sqrt[3]{\frac{1}{27} + \frac{B}{2} - \sqrt{\frac{B}{27} + \frac{B^2}{4}}}, \quad (11)$$

где $B = \frac{A^2 \pi^2}{4}$. Однако при распространении решений (10, 11) на достаточно толстый слой плазмы, особенно при больших x_N , где $n'_N \rightarrow 1$, возникают неустойчивости счета. Ввиду этого методом последовательных приближений решение (10) было уточнено:

$$U(x) = (1 - n'_N) \frac{(x_N - x)^2}{2} (1 + \gamma \frac{x_N - x}{x_N}), \quad (12)$$

где $\gamma = \frac{1,363n'_N - 1}{1,818n'_N - 1,5}$ – сферы и $\gamma = \frac{1,363n'_N - 1}{3,636n'_N - 3}$ – цилиндр.

$$n'_{N-1} = n'_N \left[1 + \frac{h}{x_N} \left[1 - \frac{(2 + \gamma)}{\pi} \right] \right], \quad (13)$$

h – шаг дискретизации координаты. Эти значения потенциала и концентрации принимались в первой от границы точке x_{N-1} . Для нахождения

потенциала в следующих промежуточных точках использовалась трехточечная параболическая интерполяция для значений $U(x)$:

$$2U_x = 2U_j + a_j \left(\frac{x - x_j}{h} \right)^2 + b_j \frac{x - x_j}{h}, \quad \text{где}$$

$$a_j = U_j - 2U_{j+1} + U_{j+2}, \quad b_j = -3U_j + 4U_{j+1} - U_{j+2}.$$

Далее на каждом шаге h использовалось разложение экспоненты в ряд $\exp U_x \approx (1 + U_x - U_j) \exp U_j$ и аналитические решения упрощенных таким образом интегралов.

Результаты расчетов приведены в виде графиков на рис. 1–3.

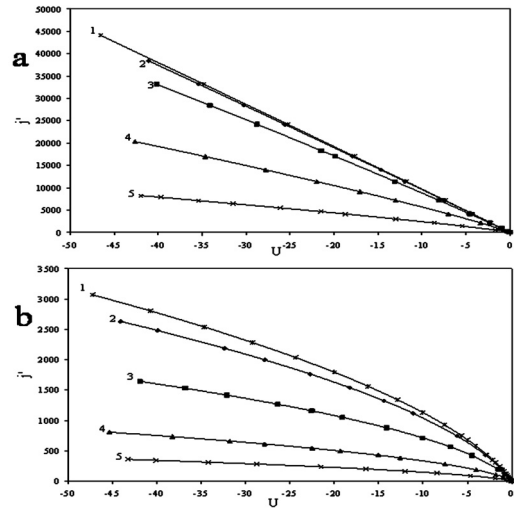


Рис. 1. Зависимости величины j' от безразмерного потенциала U для размера зонда $a = 0,001$ и различных длин свободного пробега l_i , $A = 0,01$: а) сферический зонд: 1 – $l_i = \infty$; 2 – $l_i = 10$; 3 – $l_i = 1$; 4 – $l_i = 0,1$; 5 – $l_i = 0,01$; б) цилиндрический зонд: 1 – $l_i = \infty$; 2 – $l_i = 10$; 3 – $l_i = 1$; 4 – $l_i = 0,1$; 5 – $l_i = 0,01$

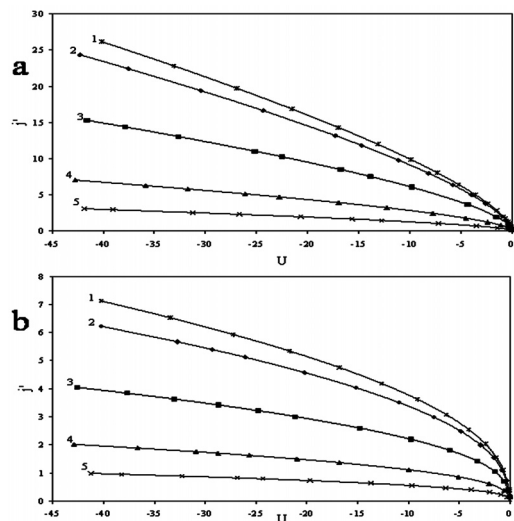


Рис. 2. Зависимости величины j' от безразмерного потенциала U для размера зонда $a = 1,0$ и различных длин свободного пробега l_i , $A = 0,10$: а) сферический зонд: 1 – $l_i = \infty$; 2 – $l_i = 10$; 3 – $l_i = 1$; 4 – $l_i = 0,1$; 5 – $l_i = 0,01$; б) цилиндрический зонд: 1 – $l_i = \infty$; 2 – $l_i = 10$; 3 – $l_i = 1$; 4 – $l_i = 0,1$; 5 – $l_i = 0,01$

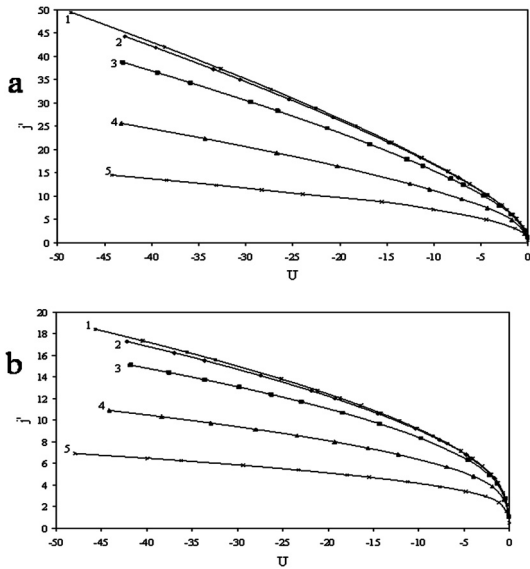


Рис. 3. Зависимости величины j' от безразмерного потенциала U для размера зонда $a = 1,0$ и различных длин свободного пробега l_i , $A = 5$: а) сферический зонд: 1 – $l_i = \infty$; 2 – $l_i = 10$; 3 – $l_i = 1$; 4 – $l_i = 0,1$; 5 – $l_i = 0,01$; б) цилиндрический зонд: 1 – $l_i = \infty$; 2 – $l_i = 10$; 3 – $l_i = 1$; 4 – $l_i = 0,1$

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

С уменьшением длины свободного пробега ионов ионный ток уменьшается монотонно при всех потенциалах зонда и частотах ионизации. Однако это влияние столкновений ионов с атомами ослабляется при увеличении частоты ионизации в объеме и при уменьшении радиуса зонда.

В случае большой частоты столкновений $l_i \ll a$ можно получить приближенные аналитические выражения для предельных случаев $a \gg 1$, $a \ll 1$. Скорость иона в данном случае определяется локальным электрическим полем,

где $v' = \sqrt{\frac{2E'l_i}{\pi}}$, где E' – безразмерная напряженность поля. Рассматриваемую область возмущения можно разбить на две части: 1) $U < 1$, где полагается $n'_e = 1$; 2) $U > 1$, где полагается $n'_e = 0$ и ионный ток сохраняется. Тогда для плотности ионного тока во внешней области ($U < 1$) получим $j' = A(x_0 - x)$, $j' = \frac{A(x_0^2 - x^2)}{2x}$, $j' = \frac{A(x_0^3 - x^3)}{3x^2}$

для плоской, цилиндрической и сферической геометрии соответственно. Так как $j' = n'v'$, для концентрации ионов получим:

$$n'_i(x) \approx \frac{A\sqrt{\pi}}{\sqrt{2|E'(x)|l_i}}(x_0 - x) \text{ – плоский случай,}$$

$$n'_i(x) \approx \frac{A\sqrt{\pi}}{2x\sqrt{2|E'(x)|l_i}}(x_0^2 - x^2) \text{ – цилиндрический случай,}$$

$n'_i(x) \approx \frac{A\sqrt{\pi}}{3x^2\sqrt{2|E'(x)|l_i}}(x_0^3 - x^3)$ – сферический случай.

При $A \gg 1$: $n'_i \gg n'_e$. Подставим значение концентрации ионов в уравнение Пуассона, пренебрегая концентрацией электронов. Тогда при $U > 1$ получим следующие выражения.

$a \gg 1$ – плоский случай:

$$j' = 1,46l_i^{1/7}A^{5/7} = A(x_0 - x), \quad (14)$$

$a \ll 1$ – сфера и цилиндр соответственно:

$$j'_s \approx \frac{0,91A^{2/5}l_i^{3/10}}{a^{11/10}}U_3^{9/10}; j'_c \approx \frac{0,9A^{3/7}l_i^{2/7}}{a \ln(\frac{x_0}{a})}U_3^{6/7}. \quad (15)$$

На рис. 4–5 представлено сравнение результатов численного расчета с расчетом по аппроксимирующим формулам (14, 15) в соответствующих случаях.

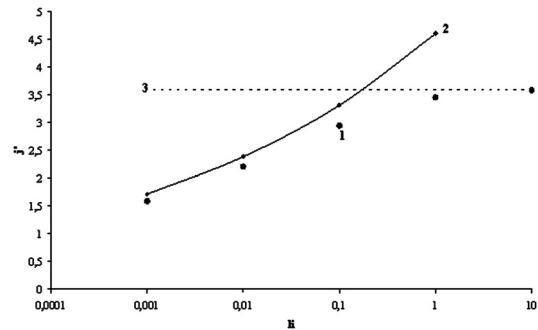


Рис. 4. Сравнение результатов численного расчета с расчетом по аппроксимирующей формуле 14 (плоский случай), $U = 30$: 1 – результаты численного расчета; 2 – расчет по аппроксимирующей формуле 14; 3 – бесстолкновительный случай. По оси абсцисс отложена безразмерная длина свободного пробега, по оси ординат – безразмерная плотность тока

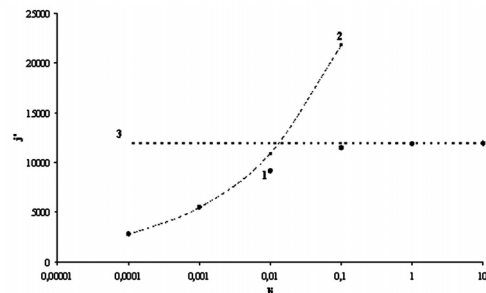


Рис. 5. Сравнение результатов численного расчета с расчетом по аппроксимирующей формуле 15 (сферический случай), $a = 0,0001$, $U = 30$: 1 – результаты численного расчета; 2 – расчет по аппроксимирующей формуле 15; 3 – бесстолкновительный случай. По оси абсцисс отложена безразмерная длина свободного пробега, по оси ординат – безразмерная плотность тока

При $A \ll 1$ в области слабых полей $U < 1$ можно положить $n'_i \approx n'_e = 1$. Тогда при больших зондах ($a \gg 1$) будем иметь $E' = \frac{\pi}{2l_i}A^2(x_0 - x)^2$,

$U = \frac{j'^3 \pi}{6l_i A}$ до $U = 1$. При полях $U \gg 1$ плотность тока сохраняется (насыщение):

$$j'_s = \left(\frac{6l_i A}{\pi} \right)^{1/3}. \quad (16)$$

На рис. 6 представлено сравнение результатов численного расчета с расчетом по аппроксимирующей формуле (16).

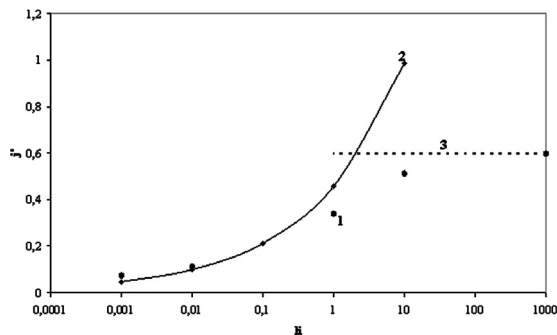


Рис. 6. Сравнение результатов численного расчета с расчетом по аппроксимирующей формуле 16 (плоский случай), $U = 30$: 1 – результаты численного расчета; 2 – расчет по аппроксимирующей формуле 16; 3 – бесстолкновительный случай. По оси абсцисс отложена безразмерная длина свободного пробега, по оси ординат – безразмерная плотность тока

При промежуточных случаях можно использовать графики рис. 1–3, проводя соответствующую перенормировку.

Следует отметить, что при малых зондах ($a \ll 1$) соотношение $l_i \ll a$ может выполняться только при больших давлениях.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Столкновения ионов с атомами монотонно уменьшают ионный ток, однако это влияние ослабляется при увеличении частоты ионизации в объеме и при уменьшении радиуса зонда. Следует отметить, что типичное значение параметра «А» в разрядах низкого давления в трубках с радиусом $r_{cm} - A \sim \frac{\lambda_o}{r_{cm}} \ll 1$, но в пылевой плазме, где потери заряженных частиц возрастают, этот параметр может существенно увеличиться.

В предельных случаях $a \gg 1$ (плоский зонд) и для практических расчетов целесообразно пользоваться аппроксимирующими выражениями из раздела 3.

Данная работа была выполнена в рамках Федеральной целевой программы «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009–2013 годы, контракт 16.740.11.0329.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Зобнин А. В., Нефедов А. П., Синельщиков В. А., Фортов В. Е. О заряде пылевых частиц в газоразрядной плазме низкого давления // ЖЭТФ. 2000. Т. 118. Вып. 3. С. 554–560.
2. Методы исследования плазмы: Пер. с англ. / Под ред. В. Лохте-Хольтгревена. М.: Мир, 1971. 552 с.
3. Немчинский В. А. Расчет ионного тока насыщения на зонд при промежуточных давлениях в пределе холодных ионов // ЖЭТФ. 1970. Т. 40. № 2. С. 416.
4. Сысун В. И. Ионный ток на зонд при промежуточных давлениях и область возмущения плазмы зондом // Физика плазмы. 1978. Т. 4. № 4. С. 931–937.
5. Сысун В. И., Хахаев А. Д., Олещук О. В., Шелестов А. С. Заряд и потенциал пылевой частицы в плазме низкого давления с учетом ионизации в области возмущения // Физика плазмы. 2005. Т. 31. № 9. С. 834–841.
6. Швейгерт В. А., Швейгерт И. В., Беданов В. М. и др. Структура кристалла микрочастиц в плазме высокочастотного разряда // ЖЭТФ. 1999. Т. 115. Вып. 3. С. 877–894.
7. Allen J. E., Boyd R. L. F., Reynolds P. The Collection of Positive Ions by a Probe Immersed in a Plasma // Proc. Phys. Soc. 1957. Vol. B70. № 3. P. 297–305.
8. Allen J. E., Turrin A. The Collection of Positive Ions by a Probe Immersed in a Plasma // Proc. Phys. Soc. 1964. Vol. 83. № 1. P. 177–179.
9. Auer R. L. The Role of Ion Currents in the Formation of Space Charge Sheaths in a Low Pressure Arc // Nuovo Cimento. 1961. Vol. 22. P. 548–564.
10. Bernstein I. B., Rabinowitz I. N. Theory of Electrostatic Probes in a Low-Density Plasma // Phys. Fluid. 1959. Vol. 2. № 2. P. 112–121.
11. Caruso A., Cavaliere A. The Structure of the Collisionless Plasma-sheath Transition // Nuovo Cimento. 1962. Vol. 26. P. 1389–1404.
12. Chen F. F. Numerical Computations for Ion Probe Characteristics in a Collisionless Plasma // J. Nucl. Energy. Part C. 1965. Vol. 7. № 1. P. 47–67.
13. Harrison E. R., Thomson W. B. The Low Pressure Plane Symmetric Discharge // Proc. Phys. Soc. 1959. Vol. 74. № 2. P. 145.
14. Kennedy R. V., Allen J. E. The Floating Potential of Spherical Probes and Dust Grains. I. Radial motion theory // J. Plasma Physics. Part 4. 2002. Vol. 67. P. 243–250.
15. Laframboise J. G. The theory of spherical and cylindrical probes in a collisionless, Maxwellian plasma at rest / Institute for aerospace studies, University of Toronto (UTIAS), Report 100, 1966.
16. Nairn C. M. C., Annaratone B. M., Allen J. E. On the Theory of Spherical Probes and Dust Grains // Plasma Sources Sci. Technol. 1998. Vol. 7. № 4. P. 478–491.
17. Tonks L., Langmuir I. A General Theory of the Plasma of an Arc // Phys. Rev. 1929. Vol. 34. № 6. P. 876–922.

АНТОН АНАТОЛЬЕВИЧ ХОМИЧЕНКОглавный физик лаборатории экологии и географии почв
Института биологии, Карельский научный центр РАН
*dubov@onego.ru***ОЛЕГ КОНСТАНТИНОВИЧ ФОМИН**кандидат химических наук (г. Петрозаводск)
dubov@onego.ru

ИССЛЕДОВАНИЕ ШУНГИТОВЫХ ПОРОД И АНТРАКСОЛИТОВ КАРЕЛИИ МЕТОДОМ ПИРОЛИТИЧЕСКОЙ МАСС-СПЕКТРОМЕТРИИ С ПОВЕРХНОСТНОЙ ИОНИЗАЦИЕЙ

В статье описан эксперимент по исследованию органического вещества шунгитов и антраксолитов четырех карельских месторождений методом пиролитической масс-спектрометрии с поверхностной ионизацией. Приведены результаты и сделаны выводы о влиянии миграционных процессов на природу органического вещества шунгитовых пород и антраксолитов.

Ключевые слова: пиролитическая масс-спектрометрия, поверхностная ионизация, шунгиты, антраксолиты, органическое вещество

В природе имеются объекты, содержание органических веществ в которых находится на уровне микропримесей. Например, антраксолиты, некоторые виды почв, археологические объекты и т. п. Обнаружение и идентификация органических веществ в этих объектах представляет большой интерес. Такая информация позволяет раскрыть историю формирования анализируемых объектов и механизм протекавших при этом процессов. Например, в проблеме происхождения шунгитов определение природы органического вещества, входящего в состав шунгитовых пород, играет ключевую роль. При решении этой задачи через экстракцию органического вещества органическими растворителями сталкиваются с трудностями, связанными с загрязнением образцов в ходе подготовки проб. Необходим метод определения присутствия органического вещества и его идентификации, при котором образец не проходил бы предварительной обработки органическими реактивами. Таким методом может быть пиролиз образца в источнике ионов масс-спектрометра с последующей ионизацией продуктов пиролиза и регистрацией масс-спектров. Масс-спектр образующихся ионов позволяет получить информацию о природе органического вещества, присутствующего в образце.

Существуют несколько классификаций шунгитовых пород (ШП) [12]. В геолого-генетической классификации М. М. Филиппова шунгиты первой разновидности (по классификации П. А. Борисова) выделены в особый класс – антраксолиты. Органическое вещество (ОВ) антраксолитов имело свою геологическую историю, отличающуюся от геологической истории ОВ ШП. На стадии нефтогенеза углеводороды, образовавшиеся из первичного ОВ, отделились от материнской породы, заполнили пустоты в породе и в дальнейшем вызревали самостоятельно, в отсутствие ощутимых взаимодействий

с минеральной частью ШП. Неотделившаяся часть ОВ вызревала в тесном взаимодействии с минеральной частью ШП. Это позволило предположить разную химическую природу ОВ в ШП и антраксолитах и послужило основанием для выделения антраксолитов в особый класс горных пород. Однако эти представления базируются на результатах геолого-геохимических исследований, в которых прямых химических характеристик ОВ не было получено. Элементный анализ антраксолитов показывает, что в них содержатся биофильные элементы [9], что является одним из главных косвенных доказательств биологического происхождения ОВ ШП.

Трудности исследования ОВ антраксолитов связаны с тем, что оно относится к битумам, вызревшим до стадии высших антраксолитов, и поэтому содержит очень низкие концентрации органических молекулярных структур (в химическом смысле). Кроме того, вследствие миграционной природы ОВ в нем содержится также очень мало зольных компонентов, соответствующих исходной минеральной составляющей. Объекты с ожидаемым сверхмалым содержанием ОВ (антраксолиты) исследователи обычно обходят вниманием, а когда решаются обнаружить в них ОВ, то не получают надежных результатов [4]. Пока для идентификации ОВ в антраксолитах использовалась ИК-спектроскопия, но метод не дал однозначных результатов качественного анализа ОВ антраксолитов [4], [7], [11] и был признан ненадежным [9]. Единственная попытка применить масс-спектрометрию к анализу ОВ антраксолитов была сделана в работе [5]. В ней были зарегистрированы лишь метан и этан в продуктах термической десорбции органических веществ из антраксолитов.

В нашей работе в качестве объектов исследования были выбраны антраксолиты из четырех карельских месторождений шунгитовых пород: Шуньга, Чеболакша, Нигозеро и Максово.

Эксперименты проводились на масс-спектрометре МИ1201Т с использованием двухленточного ионного источника с поверхностной ионизацией. Подробно методика эксперимента описана в [13].

В масс-спектрах, полученных для исследованных образцов антраксолитов, удалось наблюдать группы линий, которые связаны с ионизацией органических молекул или радикалов, образующихся при пиролизе ОБ антраксолитов на ленточке испарителя и выходящих в газовую фазу.

Источником ОБ в нашем случае являются, по всей вероятности, закрытые микропоры с включенным в них ОБ. Об этом говорит ряд фактов.

1. Высокая температура испарителя, отвечающая появлению органических ионов в масс-спектре. Если бы ОБ было адсорбировано или встроено в открытые структуры антраксолита, то появление органических ионов должно было наблюдаться при гораздо более низких температурах, отвечающих прочности адсорбционных связей или началу пиролитического разложения органических молекул (400–500 °C).

2. Взрывной характер появления ОБ в ионном источнике. Это выражается в резком появлении и росте интенсивности органических ионов при температуре образца, немного превышающей пороговую (~1030 K), в кратковременном заметном повышении давления в области источника, в сильном уширении линий органических ионов.

Высокий температурный порог пиролиза антраксолитов с выделением летучих продуктов (973 K) был также обнаружен в работе [6]. В работе [3] методом ЭПР (электронный парамагнитный резонанс) показано, что в интервале температур 600–1050 °C завершается определенного типа перестройка химических связей. Результаты нашей работы говорят о том, что при температурах выше пороговой интенсивно протекают процессы отщепления водорода и легких углеводородных частиц (CH_x , C_2H_x). Масс-спектры различных образцов антраксолитов и шунгитов исследованного ряда и их некоторые характеристики показаны на рис. 1, 2.

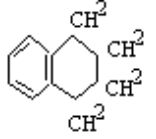
Идентификация наблюдаемых ионов ОБ может быть проведена на данном этапе исследований лишь в самых общих чертах – на уровне рядов органических соединений.

На основании работ по изучению состава остаточных битумоидов максовитов и шунгитов [2], [8], [10], [11], [12] можно было ожидать появления в масс-спектрах линий, связанных с поверхностной ионизацией углеводородов, кислот, эфиров, кетонов, азотсодержащих соединений ряда акридина, ароматических соединений с изолированными и конденсированными бензольными ядрами. С углеводородами, по-видимому, связаны ионы на массах 43, 55, 57, 85, образующиеся при поверхностной ионизации алкильных радикалов, соответственно, C_3H_7 , C_4H_7 , C_4H_9 и C_6H_{13} [1]. Последние образуются при пиролизе антраксолита на ленточке-испарителе. Особен-

но богат этими ионами масс-спектр для образца максовита из Максова (рис. 2). Для поверхностной ионизации кетонов характерно наличие пика с $m/e = 43$ (CH_3CO^+) [14], поэтому возможно, что в нашем случае ион с массой 43 имеет вклад и от поверхностной ионизации кетонов.

Группу линий с $m/e = 154$ –165 в масс-спектре нигозерского образца антраксолита (рис. 1) предположительно можно рассматривать как свидетельство присутствия в нем таких ароматических соединений, как 2-этил-тетралин ($m/e = 160$), а также дифенилметан ($M = 168$). Реакции дегидрирования этих соединений на ленте испарителя могут дать радикалы, поверхностная ионизация которых может дать группу линий в указанном интервале масс-спектра. 2-этил-тетралин был обнаружен ранее в составе остаточных битумоидов шунгитов [2]. В этой работе идентифицированы также азотсодержащие структуры ряда акридина. Последние соединения могут обеспечить появление групп линий в интервале $m/e = 183$ –215 а. е. м. (теконафтоиды из месторождений Шуныга и Чеболакша) (рис. 1). Например, октагидроакридин ($m/e = 187$) и его метилпроизводные могут в процессах дегидрирования и деметилирования дать все частицы, поверхностная ионизация которых обеспечит регистрацию ионов с $m/e = 183$ –215 а. е. м. (см. таблицу).

Идентификация возможных органических соединений в исследованных масс-спектрах

m / e	ОБ	Формула	Литература
43, 55, 57, 85	алкильные радикалы	C_3H_7 , C_4H_7 , C_4H_9 , C_6H_{13}	[1]
43	кетоны	CH_3CO^+	[14]
154–165	ароматические соединения (2-этил-тетралин)		[2], [8]
168	дифенилметан	$(\text{C}_6\text{H}_5)_2\text{CH}_2$	[1]
183–215	азотсодержащие структуры ряда акридина	$\text{C}_{13}\text{H}_9\text{N}$	[2], [8]

На рис. 1 сравниваются масс-спектры, записанные в интервале 42–300 а. е. м. при оптимальных температурах ленточек-испарителей $T_{\text{опт.}}$. $T_{\text{опт.}}$ немного отличаются друг от друга, что связано с разными кинетическими характеристиками процессов пиролиза антраксолитов разного происхождения. В графе 2 приведены генетические типы исследованных антраксолитов. Они отражают преимущественные миграционные процессы, которые привели к формированию современных антраксолитов выбранных месторождений [12]. Данные рисунки показывают, что вид масс-спектра органических ионов, по-видимому, определяется характером миграционных процессов, в которых участвовало ОБ соответствующего месторождения.

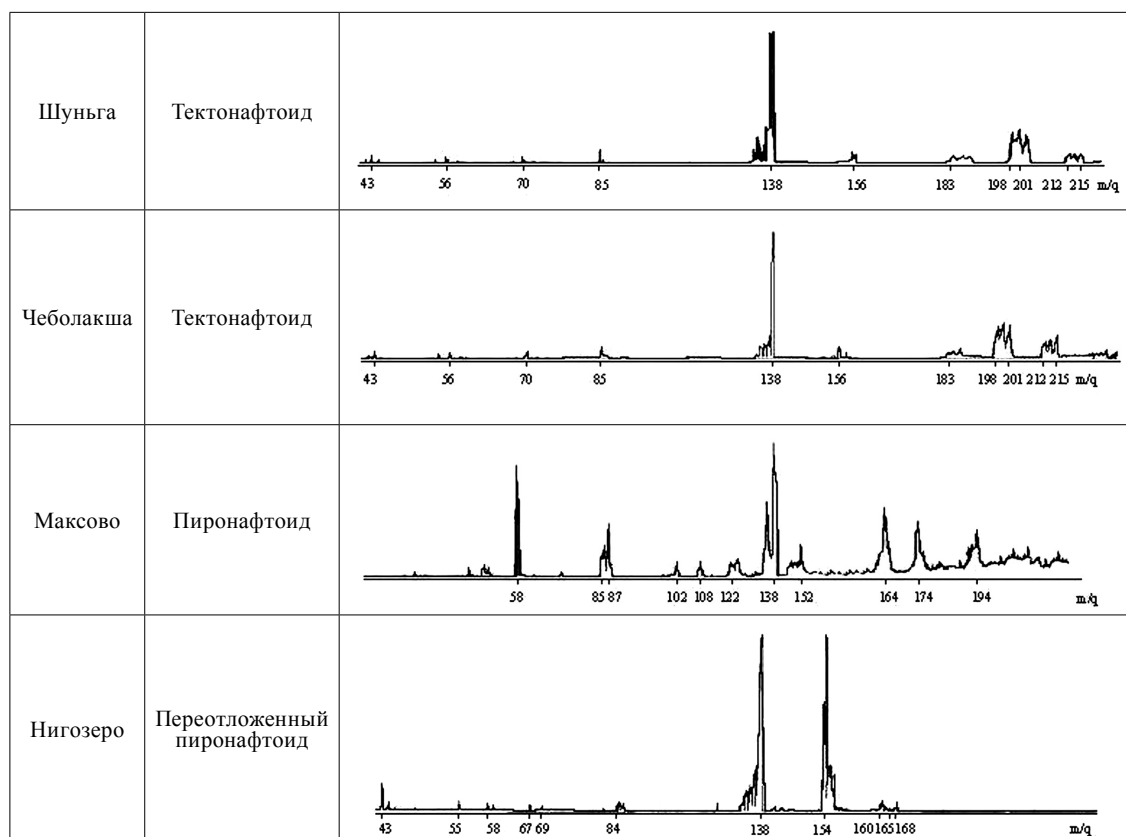


Рис. 1. Сравнение масс-спектров антраксолитов месторождений Шуньга, Чеболакша, Максово, Нигозеро

Ближе всего друг к другу находятся масс-спектры продуктов пиролиза антраксолитов, ОВ которых не претерпело заметных химических превращений при миграции (тектонафтоиды Шуньги и Чеболакши). Масс-спектр для пиронафтоида из Максова заметно обогащен «углеводородными» линиями, которые, по-видимому, отражают накопление при термическом воздействии на породу продуктов крекинга исходного ОВ – углеводородов. Переотложенный антраксолит из Нигозера, как следует из вида масс-спектра, потерял в миграционных процессах то органическое вещество, которое при пиролизе дает в масс-спектре продуктов характерную группу линий в интервале 183–215 а. е. м.

Использованный метод позволяет пролить свет и на другой важный вопрос геохимии шунгитоносных пород: имеется ли генетическая связь между миграционным ОВ и ОВ материнских пород. Для этого можно сравнить масс-спектры продуктов пиролиза шунгитов и максовитов с масс-спектрами продуктов пиролиза соответствующих антраксолитов.

На рис. 2 приведены масс-спектры продуктов пиролиза шунгита из Шуньги и максовита из Максова. Сравнение их с масс-спектрами соответствующих антраксолитов показывает, что такая связь осуществляется лишь частично. Так, пиронафтоиды (Максово) наследуют главным образом «углеводородную» составляющую ма-

теринского ОВ, а тектонафтоиды – составляющую, характеризуемую группой пиков в интервале $m/e = 183-215$ а. е. м. Гораздо в большей степени выражена аналогия между масс-спектрами шунгита и максовита, что отражает единое происхождение протошунгитового вещества. Масс-спектр продуктов пиролиза шунгита и максовита условно можно разделить на две части: группа пиков, которые прослеживаются и в антраксолитах ($m/e = 183-215$ а. е. м.), и «углеводородный» масс-спектр, занимающий весь исследованный диапазон масс и связанный, очевидно, с поверхностной ионизацией ОВ – радикалов, образующихся на ленте-испарителе. Эти группы пиков отвечают, по-видимому, двум типам ОВ, которые по-разному ведут себя в миграционных процессах. «Углеводородная» часть легко теряется в тектонафтоидах и переотложенных антраксолитах. Возможно, что отвечающее за нее ОВ обладает достаточно низким средним молекулярным весом и легко теряется в миграционных процессах. В случае антраксолита из Максова, претерпевшего достаточно сильное термическое воздействие, можно предположить, что в этом случае скорость накопления «углеводородов» за счет крекинга материнского ОВ заметно превышала потерю. Группы линий в масс-спектрах продуктов пиролиза шунгитовых пород $m/e = 183-215$ а. е. м., по-видимому, отвечают ОВ, достаточно устойчивым, чтобы со-

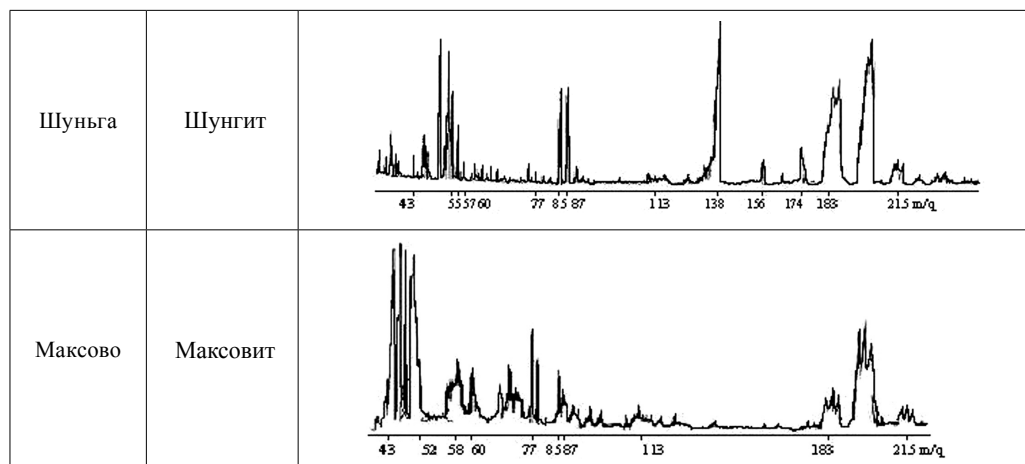


Рис. 2. Сравнение масс-спектров шунгитовых пород месторождений Шуныга и Максово

храниться в миграционных процессах, в отличие от нигозерских антраксолитов, у которых устойчивость ОВ, связанного с $m/e = 154-165$ а. е. м., выше, чем ОВ, связанного с $m/e = 183-215$ а. е. м.

Угледородные трактовки наших масс-спектров согласуются с результатами исследования ОВ в антраксолитах и шунгитах, где физико-химическими методами в качестве основного компонента зарегистрированы углеводороды [11].

ВЫВОДЫ

1. Пиролитическая масс-спектрометрия с поверхностной ионизацией продуктов пиролиза на окисленном вольфраме оказывается удобным методом сравнительного исследования органического вещества природных объектов (антраксолитов, шунгитов и др.) с малым содержанием ОВ, в отличие от метода экстракции и химического анализа экстрагированного ОВ.

2. Метод поверхностной ионизации позволяет достаточно просто и надежно зафиксировать присутствие остаточного ОВ в сильно метаморфизированных породах биогенного происхождения. Наблюдаемость или ненаблюдаемость ионов органического вещества в масс-спектрах поверхностной ионизации для образцов углеродсодержащих пород различных месторождений и характер наблюдаемых масс-спектров позволит пролить свет на историю их формирования.

3. На примере шунгитовых пород Онежской структуры показано, что такой подход позволяет надежно обнаруживать остаточное ОВ в антраксолитах, проследить влияние миграционных процессов на природу остаточного ОВ антраксолитов, устанавливать генетические связи между ОВ шунгитоносных пород.

4. Источником ОВ в нашем случае, по видимому, являются микропоры с заключенным в них ОВ.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Бейнон Дж. Масс-спектрометрия и ее применение в органической химии: Пер. с англ. Л.: Химия, 1972. 368 с.
- Бондарь Е. Б., Клесмент И. Р., Кузник М. Г. Исследования структуры и генезиса шунгитов // Горючие сланцы. 1987. № 4/4. С. 377–393.
- Галлеев А. А., Филлипов М. М. Природа дефектов молекулярной структуры высших антраксолитов по данным ЭПР-спектроскопии // Геология и полезные ископаемые Карелии. Вып. 8. Петрозаводск: КНЦ РАН, 2005. С. 121–127.
- Дюккиев Е. Ф., Туполев А. Г. Спектры поглощения шунгита-I в видимой, УФ и ИК-областях // Шунгиты – новое углеродистое сырье. Петрозаводск: Карелия, 1984. С. 52–53.
- Калинин Ю. К., Пунка А. П., Щипцова Е. И., Дюккиев Е. Ф. Состав летучих веществ миграционных шунгитов // Минеральное сырье Карелии. Петрозаводск: Институт геологии КНЦ РАН, 1977. С. 125–132.
- Ковалева А. В. Структурная эволюция твердых углеводородов в условиях термального воздействия: Автореф. дис. ... канд. геолого-минерал. наук. Сыктывкар, 2003.
- Лобзова Р. В., Галдобина Л. П. О шунгитообразовании (на примере Карелии) // Новые и дефицитные виды неметаллических полезных ископаемых. М., 1987. С. 51–57.
- Мишунина З. А., Корсакова А. Г. Геохимия керогена графитоидных и шунгитовых сланцев и карбонатов протерозоя Южной Карелии // Советская геология. 1977. № 3. С. 40–54.
- Органическое вещество шунгитоносных пород Карелии. Петрозаводск: КНЦ РАН, 1994. 208 с.
- Сидоренко А. В., Сидоренко С. А. Органическое вещество в докембрийских осадочно-метаморфических породах // Советская геология. 1971. № 5. С. 3–20.
- Соловьева А. Б., Рожкова Н. Н., Глаголев Н. Н., Зайченко Н. А. Органическое вещество шунгитовых пород // Углеродсодержащие формации в геологической истории: Труды междунар. симпозиума (2–7 июня 1998 г., Петрозаводск). Петрозаводск: КНЦ РАН, 1998. С. 131–134.
- Филиппов М. М. Шунгитоносные породы Онежской структуры. Петрозаводск: КНЦ РАН, 2002. 280 с.
- Фомин О. К., Хомиченко А. А. Использование поверхностной ионизации органических молекул для исследования некоторых вопросов геохимии // Журнал технической физики. 1998. Т. 68. № 3. С. 79–80.
- Fujii J., Kakazaki K. An investigation on surface ionisation of oxygen contained organic molecules // Int. J. Mass Spectr. Ion. Processes. 1991. Vol. 104. P. 129–136.

АЛЕКСАНДР ВЛАДИМИРОВИЧ ИВАНОВ

доктор физико-математических наук, профессор, заведующий кафедрой геометрии и топологии математического факультета, Петрозаводский государственный университет
ivanov@petrsu.ru

ТЕОРЕМА КАТЕТОВА О КУБЕ И ПОЛУНОРМАЛЬНЫЕ ФУНКТОРЫ

В предположении принципа Йенсена доказано существование неметризуемого компакта X такого, что для любого полунормального функтора F и любого n разность $F_n(X) \setminus F_{n-1}(X)$ совершенно нормальна и $F_n(X)$ наследственно сепарабельно. В частности, в предположении принципа Йенсена существует такой неметризуемый компакт X , что для любого n X^n наследственно сепарабельно и $X^n \setminus \Delta_n$ совершенно нормально, где Δ_n – обобщенная диагональ X^n .

Ключевые слова: полунормальный функтор, принцип Йенсена, теорема Катетова о кубе, наследственная сепарабельность, совершенная нормальность

Классическая теорема М. Катетова утверждает, что если для компакта X пространство X^3 наследственно нормально, то X метризуем. В. В. Федорчук [6] доказал обобщение этой теоремы для произвольного нормального функтора* F , действующего в категории $Comp$ компактов и непрерывных отображений: если степень F не меньше 3 и $F_3(X)$ наследственно нормально, то X метризуемо. Как заметил Т. Ф. Жураев, требование наследственной нормальности $F_3(X)$ в теореме Федорчука можно ослабить до требования наследственной нормальности $F_3(X) \setminus X$ (в теореме Катетова для метризуемости X достаточно наследственной нормальности $X^3 \setminus \Delta$). Задача распространения теоремы Федорчука на более широкие классы ковариантных функторов $F: Comp \rightarrow Comp$ приводит к необходимости рассмотрения степенного спектра $sp(F)$ функтора F , который определяется как множество степеней точек пространств вида $F(X)$ [4]. В этом направлении Т. Ф. Жураевым [2] получен следующий частный результат для функтора суперрасширения λ : если $\lambda_4(X) \setminus X$ наследственно нормально, то X метризуемо. Замена индекса 3 на 4 в теореме Жураева не случайна: дело в том, что 4 есть третий по счету элемент степенного спектра $sp(\lambda) = \{1, 3, 4, \dots\}$.

В настоящей работе показано, что если F – полунормальный функтор, удовлетворяющий некоторому комбинаторному условию (*), и $sp(F) = \{1, m, n, \dots\}$, то наследственная нормальность $F_n(X) \setminus X$ влечет метризуемость X . Заметим, что для любого полунормального функтора F метризуемость X всегда следует из совершенной нормальности $F_m(X)$. В то же время в работе построен пример функтора F , $sp(F) = \{1, 2, 3\}$, удовлетворяющего всем условиям нормальности, кроме сохранения прообразов, для которого в предположении принципа Йенсена ♦ существует неметризуемый компакт X такой, что $F_3(X) \setminus X$ совершенно нормально. Упомянутый компакт также обладает следующим свойством: для любого полунормального сохраняющего вес функ-

тора F и любого $n \in sp(F)$ разность $F_n(X) \setminus F_{n-1}(X)$ совершенно нормальна и $F_n(X)$ наследственно сепарабельно (теорема 3). Этот результат является новым даже для функторов возведения в степень n (теорема 2(♦)): существует неметризуемый совершенно нормальный компакт X такой, что для любого n X^n наследственно сепарабельно и $X^n \setminus \Delta_n$ совершенно нормально (здесь Δ_n – обобщенная диагональ, X^n – множество точек, имеющих хотя бы две совпадающие координаты). Более того, любое замкнутое подмножество $F \subset X^n$, в котором Δ_n нигде не плотно, имеет тип G_δ в X^n .

Отметим, что Грюнхаге [11] в предположении CH построил пример неметризуемого компакта Y , для которого Y^2 наследственно сепарабельно, $Y^2 \setminus \Delta$ совершенно нормально и Y^2 наследственно нормально. В работе показано, что компакт X из теоремы 2 имеет не наследственно нормальный квадрат. Таким образом, можно утверждать, что наследственная сепарабельность X^2 и совершенная нормальность $X^2 \setminus \Delta$ «наивно» не влекут наследственную нормальность X^2 .

Напомним некоторые определения, касающиеся ковариантных функторов в категории $Comp$. Функтор F называется *мономорфным*, если для любого вложения $i: Y \rightarrow X$ отображение $F(i): F(Y) \rightarrow F(X)$ также является вложением. Для мономорфного функтора F и замкнутого подмножества $Y \subset X$ пространство $F(Y)$ естественно отождествляется с подпространством $F(i)(F(Y))$ пространства $F(X)$.

Мономорфный функтор F *сохраняет пересечения*, если для любого компакта X и любой системы $\{Y_\alpha: \alpha \in A\}$ замкнутых подмножеств X имеет место равенство

$$F(\cap \{Y_\alpha: \alpha \in A\}) = \cap \{F(Y_\alpha): \alpha \in A\}.$$

Если F – мономорфный функтор, то для любой точки $a \in F(x)$ носитель $supp(a)$ определен следующим образом:

$$supp(a) = \cap \{Y \subset X: a \in F(Y)\}.$$

Для любого натурального n положим

$$F_n(X) = \{a \in F(X) : \text{supp}(a) \leq n\}.$$

Если F – мономорфный сохраняющий пересечения функтор, то подпространство $F_n(X)$ замкнуто в $F(X)$ для любого X и любого n . Более того, соответствие $X \rightarrow F_n(X)$ однозначно определяет подфунктор F_n функтора F (см. [10, предложение 1.5]).

Функтор F называется *непрерывным*, если он перестановочен с операцией перехода к пределу обратного спектра. Непрерывный мономорфный сохраняющий пересечения функтор называется *полунормальным*, если он сохраняет точку и пустое множество [10]. Если F – полунормальный функтор, то для любого натурального n функтор F_n также является полунормальным. При этом $F_1(X) = X$ и мы можем считать X подпространством $F(X)$. Если F – полунормальный функтор и $f: X \rightarrow Y$, то для любого $a \in F(X)$ $f(\text{supp}(a)) \subset \text{supp}(F(f)(a))$ (см. [10]).

Функтор F *сохраняет прообразы*, если для любого отображения $f: X \rightarrow Y$ и любого $A \subset Y$

$$(F(f))^{-1} F(A) = F(f^{-1} A).$$

Функтор F называется *эпиморфным*, если он сохраняет эпиморфизмы. Функтор F *сохраняет вес*, если для любого бесконечного X $w(X) = w(F(X))$. Полунормальный эпиморфный функтор F , сохраняющий вес и прообразы, называется *нормальным* [7], [8].

Следующая ниже конструкция отображения π_n предложена в [1]. В последующих формулах через n обозначается не только натуральное число, но и дискретное пространство, состоящее из n точек: $n = \{0, \dots, n-1\}$. Отображение

$$\pi_n: X^n \times F(n) \rightarrow F(X)$$

определяется равенством $\pi_n(x, \xi) = F(x)(\xi)$, в котором каждая точка $x = (x_1, \dots, x_n) \in X^n$ отождествляется с отображением $x: n \rightarrow \{x_1, \dots, x_n\} \subset X$. Для любого непрерывного функтора F и любого компакта X отображение π_n непрерывно [1]. Как показано в [10], для полунормального функтора F $\text{Im} \pi_n = F_n(X)$. Следуя [10], для каждого $n \geq 2$ введем обозначения:

$$F_{nn}(X) = F_n(X) \setminus F_{n-1}(X), \quad \Pi_n(X) = \pi_n^{-1}(F_{nn}(X)).$$

Степенным спектром F называется [4] следующее множество:

$$\text{sp}(F) = \{k: k \in \mathbb{N}, F_{kk}(k) \neq \emptyset\}.$$

Очевидно, что степенной спектр любого полунормального функтора содержит 1. В [4] показано, что для любого подмножества $K \subset \mathbb{N}$ ($1 \in K$) существует функтор exp^K , удовлетворяющий всем условиям нормальности, кроме сохранения прообразов, для которого $\text{sp}(\text{exp}^K) = K$.

Пусть F – полунормальный функтор и $\text{sp}(F) = \{1, m, n, \dots\}$ (элементы $\text{sp}(F)$ записаны в порядке возрастания). Определим отображение φ_{mn} :

$n \rightarrow m$ следующим образом: $\varphi_{nm}(i) = i$ при $i < m$, $\varphi_{nm}(i) = m-1$ при $i \geq m$. Будем говорить, что F удовлетворяет условию (*), если

$$F(\varphi_{nm})(F_{nn}(n)) \cap F_{mm}(m) \neq \emptyset.$$

Заметим, что условие (*) следует из свойства финитно строгой эпиморфности функтора F , которое рассматривалось в [4] и [5]. Таким образом, условию (*) удовлетворяют все конечные композиции рассмотренных в [5] функторов λ , P , exp , N^k ($k \geq 2$) и упомянутый выше функтор exp^k .

Пусть X – компакт, $n \geq 2$ и Δ_n – подмножество X^n , состоящее из точек, у которых хотя бы две координаты совпадают (Δ_n – обобщенная диагональ X^n).

Предложение 1. Если Δ_n является G_δ -множеством в X^n , то X метризуемо.

Доказательство. Пусть $x_1, \dots, x_{n-1}$ – попарно различные точки в X и пусть U – окрестность x_{n-1} , замыкание которой $[U]$ не содержит $x_1, \dots, x_{n-2}$. Тогда имеет место равенство

$$(\{x_1\} \times \dots \times \{x_{n-2}\} \times [U]^2) \cap \Delta_n = \{x_1\} \times \dots \times \{x_{n-2}\} \times \Delta_{[U]}.$$

Следовательно, диагональ $\Delta_{[U]}$ является G_δ -множеством в $[U]^2$ и, значит, $[U]$ метризуемо.

Из локальной метризуемости X следует его метризуемость.

Теорема 1. Пусть F – полунормальный функтор, удовлетворяющий условию (*), и $\text{sp}(F) = \{1, m, n, \dots\}$. Если для компакта X пространство $F_n(X) \setminus X$ наследственно нормально, то X метризуемо.

Доказательство. Рассмотрим вначале случай, когда в X имеются по крайней мере две неизолированные точки. Выберем точку $\delta \in F_{nn}(n)$ так, что $F(\varphi_{nm})(\delta) = \eta \in F_{mm}(m)$ (такая точка существует в силу условия (*)). Пусть $x_1, \dots, x_n$ – набор различных точек из X , где x_1 не является изолированной точкой, и пусть U и V – окрестности x_1 и x_m соответственно такие, что $x_2, \dots, x_{m-1} \notin U \cup V$ и $[U] \cap [V] = \emptyset$. Рассмотрим в X^n множество $T = [U] \times \{x_2\} \times \dots \times \{x_{m-1}\} \times [V]^{n-m+1}$ и положим

$$f = \pi_n|_{T \times \{\delta\}}: T \times \{\delta\} \rightarrow F_n(X).$$

Обозначим через R разбиение, которое порождает на T отображение $f: R = \{f^{-1}(\xi): \xi \in F_n(X)\}$. Покажем, что каждый элемент R лежит в некотором слое $\{z\} \times \{x_2\} \times \dots \times \{x_{m-1}\} \times [V]^{n-m+1} = T_z$ произведения T ($z \in [U]$) и на всех слоях разбиение R одинаково.

Пусть $z = (z_1, \dots, z_n) \in T$. Покажем, что

$$\{z_1, \dots, z_{m-1}\} \subset \text{supp}(f(z)) \subset \{z_1, \dots, z_n\}. \quad (1)$$

В самом деле, по определению отображения f , $f(z) = F(z)(\delta)$ (напомним, что под z в правой части равенства мы понимаем отображение $z: n \rightarrow \{z_1, \dots, z_n\} \subset X$). Если z взаимно однозначно (то есть все координаты точки z различны), то $\text{supp}(f(z)) = \{z_1, \dots, z_n\}$, так как $\text{supp}(\delta) = n$. Если же

среди координат z имеются совпадающие, то рассмотрим отображение $q: \{z_1, \dots, z_n\} \rightarrow \{z_1, \dots, z_m\}$, определяемое следующим образом: $q(z_i) = z_i$ при $i \leq m$, $q(z_i) = z_m$ при $i > m$. Очевидно, что композиция $q \circ z$ гомеоморфна отображению φ_{nm} . Следовательно,

$$|supp(F(q \circ z)(\delta))| = |supp(F(\varphi_{nm})(\delta))| = m.$$

Значит, $supp(F(q \circ z)(\delta)) = \{z_1, \dots, z_m\}$, откуда следует, что

$$supp(F(z)(\delta)) \supset \{z_1, \dots, z_{m-1}\}.$$

Включение (1) доказано.

Пусть $z^i = \{z_1^i, \dots, z_n^i\}$, $i = 1, 2$ — две точки из различных слоев T (то есть $z_1^1 \neq z_1^2$). Тогда в силу включения (1) $f(z^1) \neq f(z^2)$. Таким образом, элементы разбиения R не могут пересекать два различных слоя T_z одновременно.

Покажем теперь, что если $f(z_1, z_1^2, \dots, z_n^2) = f(z_1, z_2^2, \dots, z_n^2)$, $z_1 \in [U]$, то

$$f(z_1^2, z_1^2, \dots, z_n^2) = f(z_1^2, z_2^2, \dots, z_n^2)$$

для любого $z_1^2 \in [U]$. Введем обозначения:

$$a^k = (z_1, z_2^k, \dots, z_n^k), b^k = (z_1^2, z_2^k, \dots, z_n^k),$$

$$A^k = \{z_1, z_2^k, \dots, z_n^k\}, B^k = \{z_1^2, z_2^k, \dots, z_n^k\}, k = 1, 2.$$

Пусть отображения $q_k: A^k \rightarrow B^k$ определяются по формуле: $q_k(z_i) = q_k(z_i^2)$, $q_k(z_i^k) = z_i^k$, $k = 1, 2$. Тогда $b^k = q_k \circ a^k$, $k = 1, 2$ и $q_1|_{A^1 \cap A^2} = q_2|_{A^1 \cap A^2}$. Имеем

$$F(a^1)(\delta) = F(a^2)(\delta) \in F(A^1) \cap F(A^2) = F(A^1 \cap A^2).$$

Следовательно,

$$\begin{aligned} F(b^1)(\delta) &= F(q_1|_{A^1 \cap A^2})(F(a^1)(\delta)) = \\ &= F(q_2|_{A^1 \cap A^2})(F(a^2)(\delta)) = F(b^2)(\delta), \end{aligned}$$

что и требовалось доказать.

Итак, разбиение R порождает на всех слоях T_z произведения T одинаковые разбиения R' . Слой T_z гомеоморфен $[V]^{n-m+1}$, следовательно, факторпространство $T/R = f(T) \subset F(X)$ гомеоморфно произведению $\Pi = [U] \times ([V]^{n-m+1}/R')$. В силу включения (1) $\Pi = f(T) \subset F_n(X) \setminus X$, следовательно, Π наследственно нормально. Наследственная нормальность Π по лемме Катетова (см. [6]) влечет совершенную нормальность $[V]^{n-m+1}/R'$ (по построению $[U]$ бесконечно).

Возьмем теперь произвольный слой T_z (он гомеоморфен $[V]^{n-m+1}$) и рассмотрим отображение

$$g = f|_{T_z}: [V]^{n-m+1} \rightarrow [V]^{n-m+1}/R' \subset F_n(X).$$

Пусть Δ_{n-m+1} — обобщенная диагональ $[V]^{n-m+1}$. Имеем $g^{-1}(g(\Delta_{n-m+1})) = \Delta_{n-m+1}$, поскольку при $x \in \Delta_{n-m+1}$ $|supp(g(x))| = m$, а при $x \notin \Delta_{n-m+1}$ $|supp(g(x))| = n$, (см. доказательство включения (1)). Следовательно, $\Delta_{n-m+1} - G_\delta$ -множество в $[V]^{n-m+1}$. Значит, по предложению 1 $[V]$ метризуемо.

Итак, показано, что любая точка $x \in X$ имеет метризуемую окрестность. Следовательно, компакт X метризуем.

Остается рассмотреть случай, когда X имеет единственную неизолированную точку. Предположим, что X неметризуемо. Тогда X является александровской компактификацией несчетного дискретного пространства: $X = \{t\} \cup A$. Разложим A на три несчетных непересекающихся подмножества: $A = B \cup C \cup D$. Рассмотрим в $X^n \setminus \Delta_n$ подмножества

$$F_1 = \{(x_1, \dots, x_n): x_1 \in B, x_2 = t, x_3 = x_3^0, \dots, x_n = x_n^0\},$$

$$F_2 = \{(x_1, \dots, x_n): x_1 = t, x_2 \in C, x_3 = x_3^0, \dots, x_n = x_n^0\}.$$

Здесь $x_3^0, \dots, x_n^0$ — фиксированные несовпадающие точки из D . Очевидно, что F_1, F_2 замкнуты в $X^n \setminus \Delta_n$ и не пересекаются. Нетрудно также показать, что F_1 и F_2 не имеют в X^n непересекающихся окрестностей. Положим

$$h = \pi_n|_{X^n \times \{\delta\}}: X^n \times \{\delta\} = X^n \rightarrow F_n(X).$$

Тогда $h^{-1}(h(\Delta_n)) = \Delta_n$. Отображение $h|_{X^n \setminus \Delta_n}$ замкнуто, и $h(F_1) \cap h(F_2) = \emptyset$. Поскольку $h(X^n \setminus \Delta_n) \subset F_n(X) \setminus X$ и $F_n(X) \setminus X$ наследственно нормально, множества $h(F_1)$ и $h(F_2)$ имеют в $h(X^n \setminus \Delta_n)$ непересекающиеся окрестности, прообразы которых будут непересекающимися окрестностями F_1 и F_2 в X^n . Противоречие.

Предложение 2. Пусть F — полунормальный функтор и $sp(F) = \{1, m, \dots\}$. Если для компакта X пространство $F_m(X)$ совершенно нормально, то X метризуем.

Доказательство. Пусть δ — некоторая точка из $F_{mm}(m)$. Положим

$$f = \pi_m|_{X^m \times \{\delta\}}: X^m \times \{\delta\} = X^m \rightarrow F_m(X).$$

Тогда $f^{-1}(f(\Delta_m)) = \Delta_m$. Из совершенной нормальности $F_m(X)$ следует, что $\Delta_m - G_\delta$ -множество в X^m . Поэтому, согласно предложению 1, X метризуем.

Теорема 2. (♦) Существует неметризуемый совершенно нормальный компакт X такой, что для любого $n \in \mathbb{N}$

- 1) X^n наследственно сепарабельно;
- 2) $X^n \setminus \Delta_n$ совершенно нормально;
- 3) если F — замкнутое подмножество X^n и $[F \setminus \Delta_n] = F$, то $F - G_\delta$ -множество в X^n .

Доказательство. Покажем, что компакт X , построенный в работе [3] в результате топологизации спектра множеств $S = \{X_\alpha, \pi_\beta^\alpha: \alpha, \beta \in \omega_1\}$, ассоциированного с деревом Аронштейна, является искомым. Приведем необходимые элементы построения X .

В [3] использовалась следующая формулировка принципа Йенсена. Пусть R — некоторое множество мощности c , α — порядковое число. Обозначим через ${}^a R$ множество отображений из α в R . Любую последовательность вида

$$\langle s_\beta: \beta < \alpha \rangle, s_\beta \in {}^a R$$

будем называть (R, α) -последовательностью. Для каждой (R, α) -последовательности $p = \langle s_\beta : \beta < \alpha \rangle$ и каждого ординала $\gamma < \alpha$ определено ограничение p на γ :

$$p|_\gamma = \langle s_\beta : \beta < \gamma \rangle.$$

Принцип Йенсена ♦ утверждает, что для каждого $\alpha < \omega_1$ можно выбрать (R, α) -последовательность g_α так, что для любой (R, ω_1) -последовательности x множество $\{\alpha : x|_\alpha = g_\alpha\}$ пересекается с любым замкнутым несчетным подмножеством $F \subset \omega_1$. При этом последовательность $\Gamma = \langle g_\alpha : \alpha < \omega_1 \rangle$ называется универсальной гиперпоследовательностью. В дальнейшем мы будем предполагать, что универсальная гиперпоследовательность Γ фиксирована.

Рассмотрим спектр

$$Q = \{^a R, q_\beta^\alpha : \alpha, \beta < \omega_1\},$$

проекции которого определены по формуле: $q_\beta^\alpha(s) = s|_\beta$. В [3] для каждого $n \in N$ фиксированы вложения

$$\{f_{na} : \alpha \leq \omega_1\} : S^n \rightarrow Q$$

спектров $S^n = \{X_\alpha^n, (\pi_\alpha^n)^\alpha : \alpha, \beta \in \omega_1\}$ в Q , так что $f_{na}(X_\alpha^n) \cap f_{ma}(X_m^n) = \emptyset$ при $m \neq n$, $\alpha \in \omega_1$. Тем самым точки каждого пространства X_α^n отождествляются с точками $^a R$. Это позволяет говорить, что элемент g_α универсальной гиперпоследовательности Γ лежит в X_α^n , если $g_\alpha \in f_{na}(X_\alpha^n)$.

Согласно [3], подмножество $C \subset X^n$ находится в X^n в общем положении, если для любых двух точек $x = (x_1, \dots, x_n) \in C$ и $y = (y_1, \dots, y_n) \in C$ равенство $x_i = y_j$ выполняется тогда и только тогда, когда $x = y$ и $i = j$ (все координаты всех точек различны). Описанный в [10] процесс топлогизации спектра S дает спектр из метризуемых компактов с вполне замкнутыми проекциями, предел которого $X = \lim S$ является неметризуемым совершенно нормальным компактом и все конечные степени X^n наследственно сепарабельны. При этом, если $C \subset X^n$, $\pi_\alpha^n(C) \supset g_\alpha$ (π_α^n – предельная проекция спектра S^n) и g_α лежит в X^n в общем положении, то для любой предельной точки x множества g_α имеет место включение $(\pi_\alpha^n)^{-1}x \subset [C]$.

Покажем, что компакт X удовлетворяет условию 3 нашей теоремы для любого $n \in N$. При $n = 1$ это очевидно в силу совершенной нормальности X . Предположим, что условие 3 выполняется для всех $k < n$, и пусть F – замкнутое подмножество X^n , $[F \setminus \Delta_n] = F$.

Подмножество X^n , состоящее из точек, некоторая координата которых фиксирована, будем называть *слоем* X^n . Положим: $A = \{x \in F : \text{для любой окрестности } O_x \text{ множество } O_x \cap F \text{ не содержится в конечном объединении слоев } X^n\}$. Выберем в A счетное всюду плотное подмножество $B = \{x_n : n \in N\}$, и пусть $\{Ox_n^k : k \in N\}$ – счетная

база окрестностей точек x_n . По индукции, путем последовательного перебора окрестностей Ox_n^k , $n, k \in N$ легко построить счетное подмножество $C = \{y_m : m \in N\} \subset F \setminus \Delta_n$, которое лежит в X^n в общем положении и пересекается с каждой окрестностью Ox_n^k , $n, k \in N$. Очевидно, что $[C] \supset [A]$. Существует $\alpha_0 < \omega_1$ такое, что множество $C_{\alpha_0} = \pi_{\alpha_0}^n C$ лежит в $X_{\alpha_0}^n$ в общем положении, $C_{\alpha_0} = g_{\alpha_0}$ и отображение $\pi_{\alpha_0}^n$ взаимно однозначно в точках C (см. [3]). По отмеченному выше свойству спектра S для любой предельной точки x множества C_{α_0} имеем $(\pi_{\alpha_0}^n)^{-1}x \subset [C]$. Следовательно, $[C] = (\pi_{\alpha_0}^n)^{-1} \pi_{\alpha_0}^n([C])$.

Назовем слой $T \subset X^n$ F -слоем, если $[F \setminus T] \neq F$. Если T – F -слой, положим $U_T = X^n \setminus [F \setminus T]$. Поскольку F сепарабельно, F -слоев в X^n не более, чем счетное множество: $\{T_i : i \in N\}$. Положим $V_i = U_{T_i} \cap F$, $F_i = [V_i]$. Очевидно, $F_i \subset T_i = X^n$. Поскольку Δ_n нигде не плотно в F , а V_i открыто в F ,

$$F_i = [V_i] = [V_i \setminus \Delta_n] = [F_i \setminus \Delta_n].$$

Следовательно, по предположению индукции множества F_i имеют тип G_δ в слоях T_i , а значит, и в X^n . Таким образом, для каждого i существует $\alpha_i < \omega_1$ такое, что $(\pi_{\alpha_i}^n)^{-1} \pi_{\alpha_i}^n(F_i) = F_i$.

Докажем теперь, что

$$[C] \bigcup_i F_i = F. \quad (2)$$

Пусть $x \in F$ и $x \notin A$, то есть существует окрестность Ox в X^n такая, что $Ox \cap F$ лежит в конечном объединении слоев X^n . Пусть $T^1, \dots, T^k$ – минимальный набор слоев X^n , объединение которых содержит $Ox \cap F$. Тогда каждый слой T^j является F -слоем, то есть $T^j = T_{i_j}$. Покажем, что $x \in \bigcup_i F_i$. Предположим противное. Пусть $O'x = Ox \setminus \bigcup_i F_i$. Имеем $\emptyset \neq O'x \cap F \subset \bigcup T^j$, и, следовательно, для некоторого T^j

$$O'x \cap F \not\subset [(O'x \cap F) \setminus T^j].$$

Но тогда $(O'x \cap F) \cap F_{i_j} \neq \emptyset$ – противоречие. Итак, равенство (2) доказано.

Пусть теперь $\beta > \alpha_i$, $i = 0, 1, 2, \dots$. В силу (2) и выбора ординалов $\alpha_0, \alpha_1, \dots$ имеем

$$(\pi_\beta^n)^{-1} \pi_\beta^n(F) = F.$$

Следовательно, F имеет тип G_δ в X^n . Условие 3 доказано.

Из условия 3 сразу следует, что для любого n всякое замкнутое подмножество в $X^n \setminus \Delta_n$ имеет тип G_δ . Покажем, что $X^n \setminus \Delta_n$ нормально. Пусть $A_1, A_2 \subset X^n \setminus \Delta_n$ – замкнутые непересекающиеся множества. Положим $B_i = [A_i]_{X^n}$, $i = 1, 2$. Поскольку $[B_i \setminus \Delta_n] = B_i$ в силу условия 3 найдется $\alpha < \omega_1$ такое, что $(\pi_\alpha^n)^{-1} \pi_\alpha^n(B_i) = B_i$. Множества $\pi_\alpha^n B_1 \setminus \pi_\alpha^n B_2$ и $\pi_\alpha^n B_2 \setminus \pi_\alpha^n B_1$ имеют в X_α^n непересекающиеся окрестности U_1 и U_2 . Положим $V_i = (\pi_\alpha^n)^{-1} U_i$. Тогда $A_i \subset V_i$. В самом деле, если $x \in A_1$ и $\pi_\alpha^n(x) \notin U_1$, то $\pi_\alpha^n(x) \in \pi_\alpha^n B_2$ и, следовательно, $x \in B_2$, что невоз-

можно. Итак, V_1, V_2 — непересекающиеся окрестности A_1, A_2 .

Предложение 3. *Компакт X из теоремы (2) имеет не наследственно нормальный квадрат.*

Доказательство. Пусть $F \subset X$ — неметризуемое замкнутое подмножество с пустой внутренностью (такое F существует — см. [3]). Положим $A_1 = \Delta \setminus F^2$, $A_2 = F^2 \setminus \Delta$. В силу выбора $F \Delta \subset [A_1]$. Покажем, что A_1 и A_2 не имеют в X^2 непересекающихся окрестностей. Предположим, что существуют открытые в X^2 множества $V_i \supset A_i$ такие, что $V_1 \cap V_2 = \emptyset$. Поскольку X не содержит изолированных точек (см. [3]), диагональ Δ нигде не плотна в X^2 . Следовательно, $[[V_1] \setminus \Delta] = [V_1]$. Так как F^2 имеет тип G_δ в X^2 и выполнено условие 3 теоремы (2), найдется индекс $\alpha < \omega_1$ такой, что $[V_1] = (\pi_\alpha^2)^{-1} \pi_\alpha^2 [V_1]$ и $(\pi_\alpha^2)^{-1} \pi_\alpha^2 (F^2) = F^2$. По построению множества A_1 диагональ пространства X_α^2 лежит в $\pi_\alpha^2 [V_1]$. Поскольку F неметризуемо, в пересечении $\pi_\alpha^2 \Delta \cap \pi_\alpha^2 (F^2)$ найдется точка x , прообраз которой $(\pi_\alpha^2)^{-1} x$ нетривиален, и, значит, $(\pi_\alpha^2)^{-1} x \notin \Delta$. Пусть $y \in (\pi_\alpha^2)^{-1} x \setminus \Delta$. Тогда $y \in A_2$ и $y \in [V_1]$ — противоречие.

Теорема 3. (♦) *Существует неметризуемый совершенно нормальный компакт X такой, что для любого сохраняющего вес полунормального функтора F и для любого $n \in sp(F)$ $F_n(X)$ наследственно сепарабельно и $F_n(X) \setminus F_{n-1}(X)$ совершенно нормально.*

Доказательство. Пусть X — компакт из теоремы 2 и пусть $n \in sp(F)$. Пространство $(X^n \setminus \Delta_n) \times$

$\times F(n)$ совершенно нормально, поскольку $F(n)$ метризуемо (см. [9]). Имеет место включение

$$\Pi_n(X) = \pi_n^{-1}(F_n(X)) \subset (X^n \setminus \Delta_n) \times F(n),$$

значит, $\Pi_n(X)$ также совершенно нормально. В силу замкнутости отображения $\pi_n|_{\Pi_n(X)}$, отсюда следует, что $F_n(X)$ также совершенно нормально. Наследственная сепарабельность $F_n(X)$ следует из наследственной сепарабельности $X^n \times F(n)$, поскольку произведение наследственно сепарабельного пространства на пространство со счетной базой наследственно сепарабельно.

Пример. Для каждого компакта Y определим $F(Y)$ как результат склейки пространств $exp_2 Y$ и $\lambda_3 Y$ по точкам компакта Y . Ясно, что конструкция F функториальна, то есть для любого непрерывного отображения $f: Y \rightarrow Z$ определено непрерывное отображение $F(f): F(Y) \rightarrow F(Z)$ по формуле: $F(f)(\xi) = exp_2(f)(\xi)$ при $\xi \in exp_2 Y$ и $F(f)(\xi) = \lambda_3(f)(\xi)$ при $\xi \in \lambda_3 Y$. Нетрудно проверить, что функтор F удовлетворяет всем условиям нормальности, кроме сохранения прообразов, и $sp(F) = \{1, 2, 3\}$ (функтор F естественно назвать букетом функторов exp_2 и λ_3). Пусть X — компакт из теоремы 2. Тогда, поскольку

$$F(X) \setminus X = F_3(X) \setminus X = (exp_2 X \setminus X) \cup_d (\lambda_3 X \setminus X),$$

по теореме 3 пространство $F_3(X) \setminus X$ совершенно нормально.

Таким образом, условие (*) в формулировке теоремы 1 существенно.

ПРИМЕЧАНИЕ

* Все необходимые определения, касающиеся функторов, приведены ниже.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Басманов В. Н. Ковариантные функторы, ретракты и размерность // Доклады АН СССР. 1983. Т. 271. № 5. С. 1033–1036.
2. Жураев Т. Ф. Функтор λ и метризуемость бикомпактов // Вестник МГУ. Сер. 1. «Математика. Механика». 1999. № 4. С. 54–56.
3. Иванов А. В. О бикомпактах, все конечные степени которых наследственно сепарабельны // Доклады АН СССР. 1978. Т. 243. № 5. С. 1109–1112.
4. Иванов А. В. О степенных спектрах и композициях финитно строго эпиморфных функторов // Труды Петрозаводского университета. Сер. «Математика». 2000. Вып. 7. С. 15–28.
5. Иванов А. В. О функторах конечной степени и κ -метризуемых бикомпактах // Сибирский математический журнал. 2001. Т. 42. № 1. С. 60–68.
6. Федорчук В. В. К теореме Катетова о кубе // Вестник МГУ. Сер. 1. «Математика. Механика». 1989. № 4. С. 93–96.
7. Федорчук В. В., Филиппов В. В. Общая топология. Основные конструкции. М.: Изд-во МГУ, 1988. 252 с.
8. Щепин Е. В. Функторы и несчетные степени компактов // Успехи математических наук. 1981. Т. 36. Вып. 3. С. 3–62.
9. Энгелькинг Р. Общая топология. М.: Мир, 1986. 750 с.
10. Gruenhage G., Nyikos P. Normality in X^2 for compact X // Trans. Amer. Math. Soc. 1993. Vol. 340. № 2. P. 563–586.
11. Fedorchuk V., Todorčević S. Cellularity of covariant functors // Topology and its Applications. 1997. Vol. 76. P. 125–150.

АНДРЕЙ НИКОЛАЕВИЧ ТАЛБОНЕНпреподаватель кафедры теории вероятностей и анализа данных математического факультета, Петрозаводский государственный университет
antal@sampo.ru**АЛЕКСАНДР АЛЕКСАНДРОВИЧ РОГОВ**доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой теории вероятностей и анализа данных математического факультета, Петрозаводский государственный университет
rogov@psu.karelia.ru

АНАЛИЗ МАШИНОПИСНЫХ ПОДПИСЕЙ К ФОТОГРАФИЯМ В ЦИФРОВОМ ИСТОРИЧЕСКОМ АЛЬБОМЕ

В данной статье описывается метод построения поисковой системы для узкоспециализированной текстовой коллекции, допускающей наличие текстовых ошибок, на примере коллекции фотографий со строительства Беломорско-Балтийского канала. Предложенные методы можно использовать для других проектов, связанных с работой над коллекциями исторических документов.

Ключевые слова: фильтрация изображений, распознавание текста, морфологический анализ, лексический анализ, поисковый индекс

ОСОБЕННОСТИ ЗАДАЧИ

Необходимость организации поиска в большом массиве цифровых исторических фотографий, относящихся к одной более крупной тематике, потребовала решения рассмотренных в данной статье задач. В качестве исходного материала используется электронная коллекция черно-белых изображений строительства Беломорско-Балтийского канала (ББК) в формате JPEG, сделанных около 80 лет назад. Данная коллекция состоит из 8 альбомов в среднем по 800 снимков в каждом, что в общей сложности составляет почти 6,5 тыс. изображений. Коллекция находится в Карельском государственном краеведческом музее. Пример изображения представлен на рис. 1. Каждое изображение коллекции – сфотографированный лист бумаги с фотографией и напечатанным текстом, который содержит информацию о времени, месте объекта снимка и краткое описание самого объекта и сюжета.

Извлечение информации из текстовых подписей к фотографиям и последующая логическая организация этой информации позволяют построить информационную систему с возможностью поиска по данной коллекции на основе текстового запроса.

Следующие характеристики изображений коллекции существенно затруднили их анализ: цифровые изображения были получены методом фотографирования при достаточно низком разрешении (75 dpi); на текстовом фоне и на участках литер присутствуют размытые участки и эффекты «соль и перец» [1; 194], которые обусловлены изношенностью бумаги и ошибками при нанесении текста; отсутствует резкость линий букв текста; уровни серого текста и фона на некоторых фотографиях отличаются незначительно.



Рис. 1. Пример изображения коллекции, посвященной строительству ББК

ФОРМИРОВАНИЕ ТЕКСТОВОЙ КОЛЛЕКЦИИ

Общая схема обработки коллекции

Процесс извлечения текстовой информации из изображения основан на распознавании символов. Были протестированы 3 наиболее популярные системы оптического распознавания символов (Optical Character Recognition – OCR), поддерживающие кириллицу: FineReader, Google Tesseract, CuneiForm. Наилучшие результаты показал FineReader, однако даже он смог получить информацию только с 38 % правильно распознанных символов. На качество распознавания основное влияние оказало низкое качество самих изображений, прежде всего размытость и зашумленность. Кроме того, были отмечены многочисленные случаи выделения текста на участках изображения, где его не было. Для

повышения качества итоговой коллекции было решено использовать дополнительные методы. В результате анализа и серии экспериментов была установлена общая последовательность операций преобразования изображений и текста, содержащая следующие шаги.

1. Выделение областей, содержащих подписи.
2. Предварительная обработка выделенных областей различными методами повышения резкости изображений, получение альтернативных изображений подписей.
3. Распознавание с помощью OCR.
4. Анализ полученных текстовых файлов с целью отбора среди них наиболее качественных.

Выполнение данных шагов позволило увеличить общую долю правильно распознанных символов до 65 %.

Предварительная обработка изображений

Выделение областей, содержащих подписи. Для выделения областей, содержащих подпись, был использован эвристический метод, описанный в [4]. Данный метод выполняет поиск прямоугольной области изображения, содержащей текст, контрастирующей с цветом фона, с точностью около 92 %. Ошибки в работе данного алгоритма возникли в результате наличия изображений, на которых присутствовали детали, помешавшие распознаванию границ областей подписей. Например, к таким деталям относятся выступающие нижние края листа бумаги, не закрытые подписью целиком. Кроме того, подписи не удавалось распознать, если они были наклеены под большим углом к краям листа. Пример результата работы эвристического метода представлен на рис. 2.

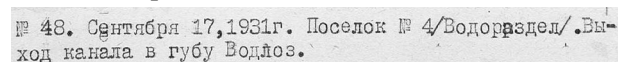


Рис. 2. Выделенная подпись к фотографии, представленной на рис. 1

Рис. 2. Выделенная подпись к фотографии, представленной на рис. 1

Методы обработки изображений. С целью повышения качества распознавания было опробовано 12 методов.

1. Эвристический метод порогового отсечения, который использует в качестве порогового значения среднее значение яркости над всей обрабатываемой областью (Cut) [4].
2. Методы пространственной фильтрации, основанные на выборе ядра (11 методов).
 - а. Методы, применяющие Лапласиан [1; 200], [4]: аддитивное изображение с использованием простого Лапласиана (ALaplace), выровненное аддитивное изображение с использованием простого Лапласиана (EALaplace), аддитивное изображение с использованием сложного Лапласиана (AELaplace), выровненное аддитивное изображение с использованием сложного Лапласиана (EAEALaplace).

- б. Методы на основе выделения границ [4]: оператор Собеля (ASobel) [1; 212], [6], оператор Робертса (ARoberts) [1; 212], оператор Прюитта (APrewitt) [5], оператор Шарра (AScharr) [8].
- с. Методы сглаживания изображения: простое сглаживание (Smooth) [1; 190], [2], [7], размытие по Гауссу (Gauss) [2], [8].
- д. Метод медианного фильтра (Median) [1; 194].

Результаты, полученные после обработки изображения подписи различными методами, будем называть альтернативными изображениями. Набор изображений подписей, обработанных одним методом, назовем альбомом.

Оценка качества распознавания

Общие идеи оценивания качества. Результат распознавания альбома будем называть текстовым альбомом. Элемент текстового альбома назовем текстовым файлом. В данной работе применительно к рассматриваемой коллекции были выделены следующие элементы подписи: номер, дата и основной текст. Разделение текстового файла на элементы осуществляется эвристическим образом на основе закономерностей, выявленных у текстов подписей [4]. Для оценки качества работы методов были рассчитаны веса слов и механизм поиска ошибок.

Алгоритм определения веса слова опирается на список словоформ слов русского языка, а также дополнительные списки словоформ, не встречающихся в основных словарях. Поиск ошибок основан на использовании расстояния Левенштейна [9]:

1. Каждое слово ищется среди множества всех словоформ.
2. Для каждого найденного слова определяются слова-кандидаты с минимальным расстоянием Левенштейна. Если минимальное расстояние превышает заданный порог или длину слова, то слово считается нераспознанным. Данный порог может быть как абсолютным, так и относительным.
3. Для каждого слова рассчитывается вес w по формуле $w = \frac{n-L}{n}$, где n – длина слова, L – расстояние Левенштейна до слова-кандидата. В случае, когда $L > n$, вес считается равным 0. Вес слова, найденного в словаре, будет равен 1.
4. Общий вес отдельного элемента текстового файла (как и всего файла), состоящего из нескольких слов, определяется как сумма весов составляющих его слов.
5. Общий вес всего текстового альбома определяется как сумма весов составляющих его текстовых файлов.

Сравнение результатов распознавания. Сравнение методов основано на сравнении общих оценок текстовых альбомов. В качестве оценки всего текстового альбома используется среднее

арифметическое оценок его текстовых файлов. Когда средние оценки двух текстовых альбомов примерно равны, производится сравнение максимальных весов текстовых файлов. В табл. 1 приведены результаты сравнения общих оценок альтернативных текстовых альбомов. Серым цветом выделены наиболее качественные методы.

Таблица 1

Пример сравнения различных методов

Метод	Средняя оценка метода	Максимальная оценка метода
Cut	0,67	0,88
EALaplace	0,6	0,82
AELaplace	0,66	0,82
EAELaplace	0,66	0,93
AScharr	0,53	0,8
Smooth	0,55	0,86
Median	0,56	0,82
Original	0,52	0,77

Вместо сравнения оценок отдельных текстовых файлов было решено сравнивать оценки соответствующих элементов текстовых файлов. Обозначим через F_i текстовый файл (в данном контексте будем называть его просто файл), соответствующий одному и тому же исходному изображению и полученный с помощью обработки этого изображения методом i ($i = 1, n$, где n – число альтернативных методов). Тогда можно представить файл как множество составляющих его элементов следующим образом: $F_i = \{t_j \mid j = \overline{1, m}\}$, где m – количество элементов файла. Предполагается, что у альтернативных файлов число элементов совпадает, а элементы с одинаковым номером соответствуют одной и той же области текста подписи исходного изображения. Кроме того, необходимо учитывать наличие случайных символов и слов.

Пусть W_{ij} – общий вес, а N_{ij} – количество слов элемента t_{ij} . Тогда оценка элемента t_{ij} будет рассчитываться следующим образом:

$$R_{ij} = S_{ij} \cdot D_{ij},$$

$$\text{где } S_{ij} = \begin{cases} \frac{W_{ij}}{N_{ij}}, N_{ij} > 0 \\ 0, N_{ij} = 0 \end{cases}, D_{ij} = \begin{cases} \sqrt{1 - \left(\frac{N_{ij} - \overline{N}_j}{\overline{N}_j}\right)^2}, N_{ij} \leq 2 \cdot \overline{N}_j \\ 0, N_{ij} > 2 \cdot \overline{N}_j \end{cases} \text{ и } \overline{N}_j = \frac{\sum_{i=1}^n N_{ij}}{n}.$$

В приведенной выше формуле S_{ij} играет роль относительной оценки элемента, определяющей долю правильно распознанных в нем символов. Фактор D_{ij} в данном случае определяет отклонение количества слов элемента t_{ij} от среднего, то есть от того количества слов, которое следовало бы ожидать после распознавания.

В результате сравнения формируется новый текстовый файл:

$$F^* = \{t_j^* \mid t_j^* = t_{i^*j}, i^* = \arg \max_i (R_{ij}), i = \overline{1, n}, j = \overline{1, m}\}.$$

Результаты сравнения альтернативных текстовых файлов, соответствующих одному исходному изображению, приведены в табл. 2. Серым цветом выделены элементы с наибольшей оценкой.

Таблица 2

Пример сравнения альтернативных текстовых файлов

Метод	Оценка текста	Оценки атрибутов	
		Дата	Номер
Cut	0,8	1	0,6
EALaplace	0,78	0,85	0,8
AELaplace	0,85	0,75	0,75
EAELaplace	0,82	0,9	0,9

АНАЛИЗ ТЕКСТОВОЙ КОЛЛЕКЦИИ

Общий алгоритм анализа текстовой коллекции

Общая схема анализа представлена на рис. 3. Данная схема представляет собой условно-бесконечный цикл обработки коллекции, в котором на каждой итерации происходит постепенное улучшение качества коллекции. При этом схема предполагает наличие условия выхода. Момент, когда можно завершить цикл, либо определяется человеком, либо задается двумя пороговыми значениями: долей неизвестных слов и долей слов с ошибками.

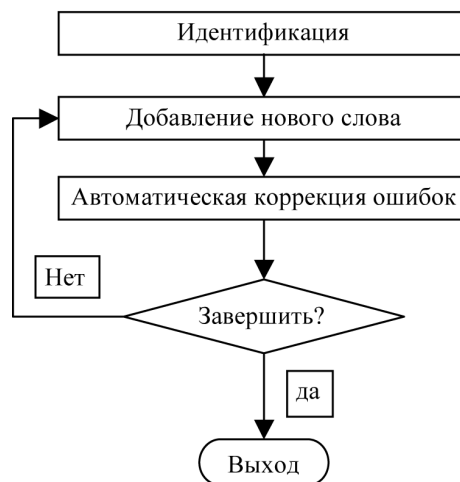


Рис. 3. Общая схема анализа текстовой коллекции

Идентификация слов

На данном этапе производится расчет весов слов для всех текстовых файлов. Для каждого распознанного слова извлекается тематическая информация на основе имеющихся тематических словарей, а также с помощью морфологического анализа, в результате чего определяется тематика слова. В данной работе используются следующие тематические словари: имен, географических названий, строительной техники,

сооружений, общий словарь (приведен здесь, поскольку является словарем по умолчанию). В качестве морфологического анализатора используется *Mystem* (Яндекс) [3], выявляющий флаг соответствия имени, фамилии, отчества или географического названия.

Добавление нового слова

Данный процесс требует участия пользователя. При добавлении нового слова кроме самого слова указывается также дополнительная информация: часть речи, нормальная форма слова, словоформы (наиболее часто встречающиеся), тематика.

Автоматическая коррекция ошибок

Данный процесс может выполняться автоматически, в случае определения необходимых пороговых значений. В результате добавления нового слова часть слов, которые до этого были признаны нераспознанными или ошибочными, могут изменить свой статус, поэтому на следующем шаге требуется пересчет весов всех слов, имеющих вес меньше 1. В случае, когда очередное рассматриваемое слово будет достаточно близко к новому слову, можно выполнить коррекцию слова без участия пользователя. Критерий близости может определяться превышением как абсолютным, так и относительным (разделенным на длину слова) значением расстояния Левенштейна заданного порогового значения.

Кроме решений о коррекции система должна также принимать решение о близости к тому или иному слову в случае, когда есть несколько слов-кандидатов с одинаковым расстоянием Левенштейна. Основным решением этой проблемы является определение тематики каждого кандидата и отнесение рассматриваемого слова к одной из них, однако в данной работе указанный метод не реализован.

Построение индекса

Построение полнотекстового индекса выполняется с помощью приведения всех слов к нормальной форме. Для этого используется как морфологический анализ (*Mystem*), так и дополнительные словари, заполненные пользователем в процессе добавления новых слов. Формирование индекса можно осуществить с помощью любой СУБД, поддерживающей полнотекстовый поиск. Суть данной операции заключается в заполнении специально подготовленной таблицы, включающей в себя информацию о файлах коллекции, атрибуты, найденные в текстах подписей, а также поле для хранения нормальных форм слов основного текста. Последнее поле индексируется для полнотекстового поиска средствами СУБД. В данной работе использовалась СУБД MS SQL Server.

Для повышения точности индекса были разработаны специальные правила лексического анализа, позволяющие выполнять поиск и подстановку отдельных словосочетаний внутри ин-

декса с заменой на уникальные ключевые слова. Каждое правило можно представить в виде ориентированного набора элементов определенного типа. В данной работе были выделены следующие типы элементов правил: строковая константа, лексема, например слово, состоящее из букв алфавита, лексическая группа (часть речи), тематическая группа (слово относится к одному из тематических словарей), онтологическая группа (слово принадлежит определенному таксономическому узлу).

Данные правила позволяют выполнять поиск ключевых словосочетаний не только в текстовой коллекции, но и в поисковом запросе, что, в свою очередь, позволяет уточнять также и результат поиска. Имеется возможность осуществлять поиск различных сокращений, которые в большинстве случаев никак не распознаются.

УТОЧНЕНИЕ И РАСШИРЕНИЕ ПОИСКОВОГО ЗАПРОСА

Уточнение поискового запроса реализовано с помощью описанного выше правила лексического анализа, при котором отдельные словосочетания, содержащиеся в запросе, заменяются ключевыми словами.

С помощью онтологии / тезауруса можно расширить запрос за счет включения понятий онтологии / тезауруса, связанных с ключевыми словами запроса различными отношениями:

1. С помощью синонимов;
2. В глубину за счет отношений «род – вид» и «часть – целое»;
3. В другую сторону на 1 шаг, рассматривая и другие отношения, например ассоциативные;
4. С помощью комбинации различных отношений.

ПРОГРАММНОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ

Для выполнения операций по обработке изображений и анализа текстовой коллекции был разработан программный комплекс «ВВКМанипегер». Для выполнения поиска по рассматриваемой коллекции была разработана специальная программа «ВВКClient», осуществляющая полнотекстовый поиск по сформированному индексу. Поиск осуществляется средствами СУБД и основан на алгоритме ранжирования BM25 [10]. На рис. 4 представлен пример работы программы. Данная программа позволяет выполнять следующие операции:

1. Обычный поиск по текстовому запросу.
2. Расширенный поиск по текстовому запросу и атрибутам (дата, номер).
3. Поиск по текстовому запросу в обоих случаях (пункты 1 и 2) с дополнением операций уточнения и расширения запроса.
4. Настройка клиента с возможностью указать источники изображений, а также включаемые связи по умолчанию для метода расширения запроса.

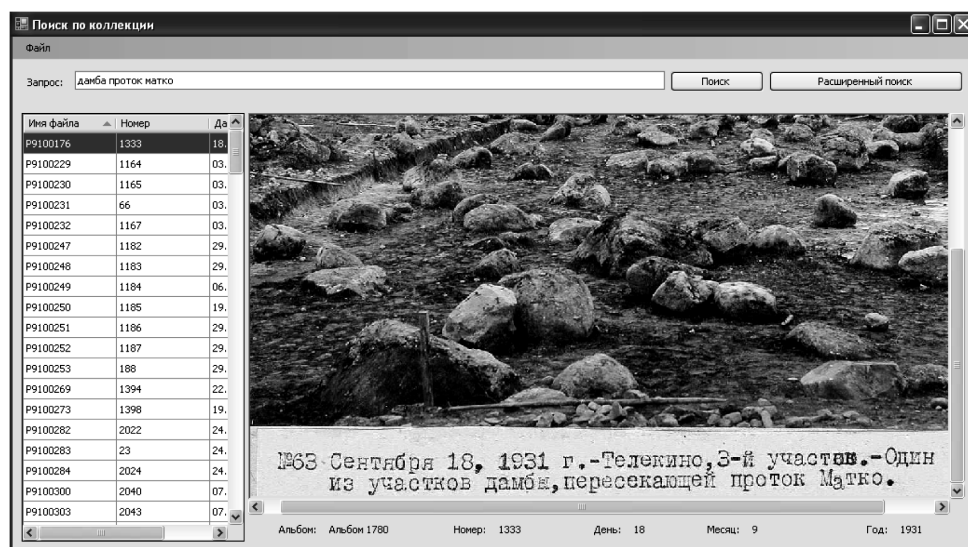


Рис. 4. Пример работы программы-клиента

Операция уточнения запроса реализована с помощью специального индекса, в котором для каждого правила определены константы, являющиеся ключами в данном индексе. Для операции расширения запроса используется тезаурус, поддерживающий отношения «род – вид», «часть – целое» и синонимы. Данный тезаурус представляет собой XML-файл, который полностью загружается в память программы для ускорения поиска по узлам тезауруса.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате работы была обработана часть коллекции изображений строительства ББК, предоставленная Карельским государственным краеведческим музеем, объемом 2000 снимков.

Для построения индекса была разработана отдельная программная система «BVKManager». Кроме того, для поиска была разработана специальная программа, использующая алгоритм ранжирования BM25 на базе СУБД MS SQL Server (рис. 4) и поддерживающая операции уточнения и расширения запроса.

В дальнейшем планируется провести анализ методов обработки изображений с целью обнаружения лиц, контуров и текстур. Будут исследованы возможности библиотеки OpenCV, в частности функции обнаружения объектов на основе вейвлета Хаара. Предполагается применить методы распознавания для поиска объектов с характерной текстурой, например воды, стенок карьеров или бревенчатых домов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гонсалес Р., Вудс Р. Цифровая обработка изображений: Пер. с англ. М.: Техносфера, 2005. 1072 с.
2. Каньковски П. Как работают фильтры размытия [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://www.computerra.ru/gid/rtfm/graphic/35934/>
3. О программе mystem [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://company.yandex.ru/technology/mystem/>
4. Талбонен А. Н., Рогов А. А. Анализ машинописных подписей к фотографиям в цифровом альбоме // Электронные библиотеки: перспективные методы и технологии, электронные коллекции: Труды XII Всероссийской научной конференции RCDL'2010. Казань: Казан. ун-т, 2010. С. 422–429.
5. Edge Detection [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://www.cse.unr.edu/~bebis/CS791E/Notes/EdgeDetection.pdf>
6. Engel K. Real-Time Volume Graphics. AK Peter, 2006. P. 112–113.
7. Image Processing for Dummies with C# and GDI+ Part 2 – Convolution Filters [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://www.codeproject.com/KB/GDI-plus/csharpfilters.aspx>
8. Scharr H. Optimal Operators in Digital Image Processing [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://archiv.ub.uni-heidelberg.de/volltextserver/volltexte/2000/962/>
9. Wagner R. A., Fischer M. J. The String-to-string correction problem [Электронный ресурс]. Режим доступа: http://www.daimi.au.dk/~cstorm/courses/AiBS_e08/papers/WagnerFisher_EditDist.pdf
10. Zaragoza H., Craswell N., Taylor M., Saria S., Robertson S. Microsoft Cambridge at TREC-13: Web and HARD tracks [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://trec.nist.gov/pubs/trec13/papers/microsoft-cambridge.web.hard.pdf>

АННА МИХАЙЛОВНА ВОРОНОВАпреподаватель кафедры прикладной математики и кибернетики математического факультета, Петрозаводский государственный университет
*voronova_am@petrsu.ru***РОМАН ВЛАДИМИРОВИЧ ВОРОНОВ**кандидат технических наук, доцент кафедры прикладной математики и кибернетики математического факультета, Петрозаводский государственный университет
*rvtoronov@karelia.ru***МАКСИМ АНАТОЛЬЕВИЧ ПИСКУНОВ**кандидат технических наук, доцент кафедры технологии и оборудования лесного комплекса лесинженерного факультета, Петрозаводский государственный университет
piskunov_mp@list.ru

МОДЕЛИРОВАНИЕ СХЕМЫ ВОЛОКОВ ПРИ ПОМОЩИ ПОКРЫТИЯ ГИПЕРСЕТИ ВЗВЕШЕННЫМ КОРНЕВЫМ ДЕРЕВОМ

В статье представлено описание задачи размещения схемы волоков на лесосеке, приведен анализ существующих методов решения задачи, предложен новый подход для решения задачи на гиперсети. Изложены математическая модель в виде двухуровневой гиперсети и алгоритм решения задачи покрытия гиперсети минимальным взвешенным корневым деревом, рассмотрен пример.

Ключевые слова: гиперграф, гиперсеть, покрывающее дерево гиперсети, оптимизация, схема волоков

СОДЕРЖАТЕЛЬНАЯ ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

При проведении сплошных рубок леса трелевочный трактор осуществляет доставку сваленных деревьев к верхнему складу по временным транспортным путям, называемым волоками. Трелевочный трактор начинает движение от верхнего склада, подъезжает к месту рубки, полностью нагружается деревьями, возвращается для выгрузки на верхний склад и отправляется за следующей партией леса. Задача состоит в проектировании схемы волоков на территории лесосеки. При этом необходимо учитывать ограничения, связанные с рельефом и свойствами грунта лесосеки, особенностями маневренности трактора.

АНАЛИЗ СУЩЕСТВУЮЩИХ МАТЕМАТИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ

В работах Э. О. Салминена, С. В. Гурова, Б. М. Большакова, И. В. Григорьева [1], [5] исследована задача определения схемы волоков на лесосеке с учетом некоторых свойств грунта. В модели территория лесосеки разбита на непересекающиеся квадратные участки (участки набора пачки деревьев). Каждому участку поставлено в соответствие число – обобщенный коэффициент, характеризующий степень воздействия трелевочного трактора на грунт участка. Однако заметим, что участок сбора пачки деревьев имеет достаточно большие размеры и в условиях пересеченной местности не может быть однозначно охарактеризован одним значением, показывающим свойства грунта.

Следовательно, при моделировании лесосеки логично разбивать ее территорию на более

мелкие непересекающиеся участки, характеризующиеся консистенцией грунта, высотой над уровнем моря и объемом произрастающего леса. Сбор одной пачки деревьев в таком случае осуществляется с нескольких участков. Такая модель лучше учитывает непригодные и малоприспособные для проезда техники участки.

ПРИМЕНЕНИЕ ТЕОРИИ ГИПЕРСЕТЕЙ И ГИПЕРСЕТЕВОЙ ТЕХНОЛОГИИ

Теория гиперсетей, изложенная в работах В. К. Попкова, Г. Ы. Токтошова [2], [3], [4], применяется для моделирования задач сложной сетевой структуры, таких как строительство инженерных сетей электросвязи, сетей автомобильных дорог, нефтепроводных, газопроводных сетей и пр. Гиперсетевая технология описывает процесс формализации исходной задачи и построения соответствующей иерархической гиперсети. В данной статье гиперсетевая технология применена для моделирования схемы первичного транспорта древесины.

Математическая модель лесосеки построена в виде двухуровневой гиперсети специального вида. Нижний уровень гиперсети является гиперграфом, построенным методом сеток [4], [6], верхний уровень – ориентированным графом, узлы которого соответствуют гиперребрам нижнего уровня.

ОПИСАНИЕ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ

Пусть область D представляет собой проекцию территории лесосеки на плоскости xOy . Разобьем область D регулярной сеткой с шагом l (м), образованной двумя семействами прямых:

параллельных оси Oy и параллельных оси Ox . Сопоставим каждой клетке сеточной модели территории лесосеки вершину гиперсети.

Определим гиперсеть $A = (V, W, E, F', F'', G)$, в которой V – множество вершин, W – множество гиперребер, E – множество дуг, $F' : W \rightarrow 2^V$, $F'' : W \rightarrow 2^V$ – отображения, ставящие в соответствие каждому гиперребру $w \in W$ два подмножества $F'(w) \subset V$ и $F''(w) \subset V$ его вершин, F' определяет упорядоченное множество вершин, соответствующих участкам непосредственного проезда трелевочного трактора, F'' – множество вершин, соответствующих участкам, которые попадают в зону охвата манипулятора трелевочного трактора. $G : E \rightarrow W \times W$ – инъективное отображение, ставящее в соответствие каждой дуге $e \in E$ упорядоченную пару $G(e) = (w_1(e), w_2(e))$ гиперребер множества W , $w_1(e)$ и $w_2(e)$ – обозначения для первого и второго элементов пары $G(e)$.

Таким образом, тройки $A'_1 = (V, W, F')$, $A'_2 = (V, W, F'')$ являются гиперграфами, а тройка $A_2 = (W, E, G)$ – орграфом. В орграфе A_2 гиперребра множества W будем называть узлами.

Пусть $T = (S, r, p)$ – корневое дерево в орграфе A_2 , в котором $S \subset W$ – множество узлов дерева, $r \in S$ – корень дерева, $p : S \rightarrow S$ – отображение, ставящее в соответствие каждому узлу $s \in S$ его родителя $p(s)$ в дереве. Это означает, что если дереву T принадлежит дуга (w_1, w_2) , то $p(w_1) = w_2$ (все дуги корневого дерева направлены к корню).

Очевидно, что отображение p должно обладать следующими свойствами: 1) $p(r) = r$; 2) для любого $s \in S$ $p(\dots p(p(s)) \dots) = r$.

Второе свойство означает, что из любого узла дерева существует путь до корня, состоящий из дуг дерева.

Будем говорить, что дерево $T = (S, r, p)$ покрывает вершину $v \in V$, если существует $s \in S$, для которого $v \in F'(s)$. Назовем корневое дерево T покрывающим деревом гиперсети A , если $\bigcup_{s \in S} F'(s) = V$. Таким образом, покрывающее дерево гиперсети покрывает все его вершины.

Обозначим как J упорядоченное индексное множество консистенций грунта, $J = \{1, \dots, k\}$. Будем считать, что при увеличении индекса тип консистенции грунта будет улучшаться. Обозначим как I упорядоченное индексное множество категорий глубины колеи, $I = \{1, \dots, g\}$. Будем считать, что при увеличении индекса категория глубины колеи будет улучшаться.

Для каждой вершины $v \in V$ гиперсети известны следующие характеристики: $\mu(v) \in J$ – консистенция грунта, $R(v)$ – высота над уровнем моря (м), $K(v)$ – запас леса (м³).

Для каждого гиперребра $w \in W$ определим $\Omega(w) \in J$ – консистенцию грунта как наихудшее

значение консистенции грунта по всем вершинам множества $F'(w)$:

$$\Omega(w) = \min_{v \in F'(w)} \mu(v), \forall w \in W.$$

Для каждого гиперребра $w \in W$ обозначим начальную вершину $beg(w) \in F'(w)$ и конечную вершину $end(w) \in F'(w)$. Пара вершин $m(w) = (beg(w), end(w))$ является направленным отрезком, определяющим траекторию и направление движения трелевочного трактора при сборе леса с территории, соответствующей гиперребру. Обозначим $\varphi_{m(w)}^{m(s)}$ – угол между отрезками соответствующих смежных гиперребер гиперсети.

Пусть $z_w = |F'(w)|$ – мощность множества $F'(w)$,

$w \in W$. Обозначим $q = \{v_1, v_2, \dots, v_{z_w}\} \in F'(w)$ – последовательность вершин вдоль направленного отрезка из множества $F'(w)$ для гиперребра $w \in W$.

Для каждого гиперребра $w \in W$ определим перепады высоты между соседними вершинами последовательности q :

$$R'_{i-1}(w) = R(v_i) - R(v_{i-1}), \forall i = 2, \dots, z_w, \forall w \in W.$$

Пусть $n = |S|$ – мощность множества S . Назовем корневое дерево T помеченным, если все его узлы пронумерованы числами от 1 до n в порядке обхода трелевочным трактором территории, соответствующей узлам, при сборе леса. Тогда для каждого узла $s \in S$ обозначим через $v_T(s)$ множество узлов дерева T , у которых номера меньше, чем номер узла s , то есть соответствующая территория обходится трелевочным трактором раньше.

Для каждого узла $s \in S$ дерева T определим остаточное множество:

$$U_T(s) = F''(s) \setminus \left(\bigcup_{w \in v_T(s)} F''(w) \right), \forall s \in S.$$

Для каждого узла $s \in S$ дерева T определим остаточный запас леса:

$$K_T(s) = \sum_{v \in U_T(s)} K(v), s \in S.$$

Обозначим $h(s)$ – число потомков узла $s \in S$ в дереве T . $h(s)$ определяет количество проездов по территории волока, соответствующего узлу $s \in S$.

Пусть задана функция $\Phi : J \times Z^+ \rightarrow I$, такая что для фиксированного $j \in J$ $\Phi(j, h)$ как функция от $h \in Z^+$ является неотрицательной возрастающей вогнутой функцией. Функция Φ определяет зависимость образования категории колеи для каждой консистенции грунта в зависимости от числа проездов трелевочного трактора.

В качестве критерия оптимальности задачи определим лексикографическую целевую функцию $(y_1(T), \dots, y_g(T)) \rightarrow \min$, которая минимизи-

рует количество узлов дерева, соответствующих территории пролегания участков волокна по приоритетам в порядке возрастания индекса категории колеи. Компонента вектора $y_i(T)$ – число узлов множества S дерева T , соответствующих волокнам с индексом категории глубины колеи t , $t \in \{1, \dots, g\}$:

$$y_i(T) = \#\{s \mid s \in S, t = \Phi(\Omega(s), h(s))\}.$$

Сформулируем задачу. Для заданной гиперсети A и чисел $P_0, P, \alpha, l, \gamma', \gamma''$ требуется найти корневое помеченное покрывающее дерево $T = (S, r, p)$, для которого вектор $(y_1(T), \dots, y_g(T))$ принимает минимальное значение, при этом:

1. Для каждого узла $s \in S$ дерева T остаточный запас $P_0 \leq K_T(s) \leq P, \forall s \in S$, где $[P_0, P]$ – допустимый интервал объема пачки леса (м^3) для трелевочного трактора.

2. Для каждой пары смежных узлов дерева T угол между направленными отрезками смежных узлов ограничен α , α – недопустимый угол поворота трелевочного трактора:

$$\varphi_{m(w)}^{m(s)} \leq \alpha, p(s) = w, s, w \in S.$$

3. Для каждого узла $s \in S$ дерева T перепады высот между соседними участками лежат в пределах $[tg(\gamma'') l, tg(\gamma') l]$: $\gamma' < 0, \gamma'' \geq 0, \gamma'$ – максимальный угол наклона при движении трелевочного трактора вверх, γ'' – максимальный угол наклона при движении трелевочного трактора вниз, l – шаг (м) накладываемой сетки:

$$tg(\gamma') l \leq R'_{i-1}(s) \leq tg(\gamma'') l, \forall i = 2, \dots, z_s, \forall s \in S.$$

Искомое дерево определяет схему волоков, корень дерева указывает место погрузочного пункта.

АЛГОРИТМ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧИ

Алгоритм решения рассмотренной задачи основан на поиске с возвратом. Вначале корневое дерево состоит из одного узла. Затем на каждой итерации ищется дуга, добавление которой в дерево приведет к наименьшему увеличению значения целевой функции. Поиск такой дуги осуществляется перебором всех возможных вариантов добавления не более чем N дуг в дерево. Параметр N подбирается в зависимости от числа узлов орграфа второго уровня.

Приведем псевдокод предложенного алгоритма построения покрывающего дерева гиперсети T с корнем r .

```
FindTree( $T, r, N$ )
 $T = \text{tree}(r)$ 
while not cov( $T, V$ ) do
     $e' = \argmin\{g(\text{add}(T, e), 1, f(T), \text{area}(T), N) \mid$ 
         $e \in \text{set}(E, T)\}$ 
     $T = \text{add}(T, e')$ 
return  $T$ 
```

В начале алгоритма FindTree дерево T состоит из одного корня r . Затем на каждой итерации цикла while перебираются все возможные варианты траекторий добавления в дерево не более чем N дуг. Лучшей признается та траектория, для которой отношение приращения целевой функции задачи к приращению числа покрытых вершин будет минимальным. В результате в дерево добавляется первая дуга лучшей траектории. Этот процесс повторяется до тех пор, пока дерево не покроет все вершины гиперсети.

Функция $\text{tree}(r)$ строит начальное дерево T , состоящее из одного корня r . Функция $\text{cov}(T, V)$ проверяет покрытие вершин гиперсети деревом, возвращает истину, если все вершины покрыты, иначе ложь. Множество первых дуг траекторий генерируется при помощи функции $\text{set}(E, T)$. Функция $\text{add}(T, e)$ формирует новое дерево с добавленной в него дугой e и возвращает его. Функция $f(T)$ рассчитывает и возвращает целевую функцию задачи для дерева T . Функция $\text{area}(T)$ возвращает множество вершин, покрытых деревом T . Функция $g(\dots)$ перебирает траектории добавления не более чем N дуг и возвращает минимальное отношение приращения целевой функции задачи к приращению числа покрытых вершин.

Временная сложность алгоритма в худшем случае равна $O(|V|^{2N+1})$, так как на каждом шаге перебирается не более чем $|V|^{2N}$ траекторий добавления не более чем N дуг и добавление каждой дуги должно покрыть как минимум одну новую вершину.

ТЕСТОВЫЙ ПРИМЕР

Проиллюстрируем результат работы алгоритма на примере (рис. 1). Расчет произведен на гиперсети с 988 вершинами, 840 гиперребрами (узлами), более чем 10 000 дугами. Параметр N (глубина перебора вариантов дуг) равен 2.

Для примера использованы данные одного из лесозаготовительных предприятий Карелии. На рис. 1 территория лесосеки закрашена оттенками серого цвета, и чем темнее участок, тем меньше устойчивость грунта. Черным квадратом отмечено место размещения верхнего склада. Рассчитанная схема волоков содержит 45 волоков, из них 2 участка волокна с недопустимой глубиной колеи, 1 – с критической глубиной колеи, 20 – с глубокой колеей, 22 – с рекомендуемой глубиной колеи. На рис. 1 чем больше толщина линии, тем больше глубина колеи волокна.

На рис. 2 приведена схема волоков, рассчитанная на тех же данных о лесосеке методом динамического программирования, изложенным в [5]. В качестве территории сбора пачки деревьев взяты укрупненные участки (квадраты 3×3 деления сетки), данные о свойствах грунта для укрупненных участков – усредненные значения данных с участков, попавших внутрь квадрата.

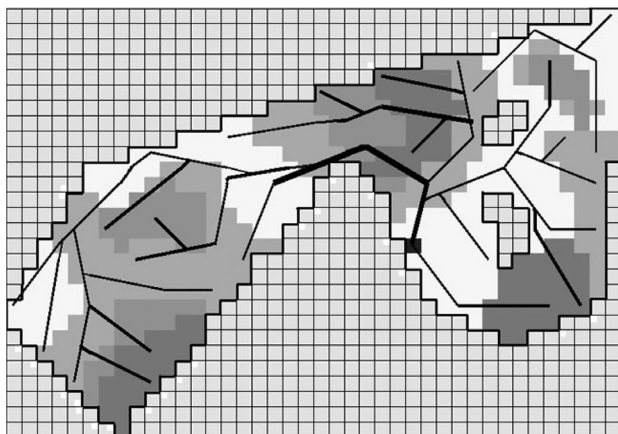


Рис. 1. Схема волоков, полученная алгоритмом FindTree на гиперсети

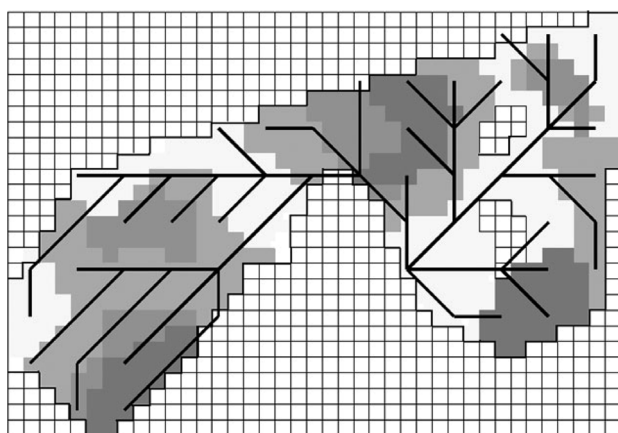


Рис. 2. Схема волоков, полученная методом динамического программирования на графе

Для сравнения схем была построена гиперсеть, вершины которой соответствуют участкам (квадратам 1×1), гиперребра – территориям сбора пачки леса (квадратам 3×3). Гиперребра образуют разбиение множества вершин. Дуги связывают гиперребра, соответствующие соседним квадратам 3×3 . Подмножествам вершин, по которым проходит волок, соответствуют квадраты 1×1 , пересекающиеся с отрезками, соединяющими центры квадратов 3×3 .

Полученной методом динамического программирования схеме волоков соответствует корневое покрывающее дерево T построенной

гиперсети, для него можно определить значения целевого вектора $(y_1(T), \dots, y_g(T))$. Этот вектор используется для сравнения рассчитанных разными методами схем волоков. При этом глубина колеи рассчитанной схемы волоков определялась так же, как глубина колеи в гиперсетевой модели.

В результате схема волоков содержит 61 волок: из них 3 участка волока с недопустимой глубиной колеи, 4 – с критической глубиной колеи, 26 – с глубокой колеей, 28 – с рекомендуемой глубиной колеи. Увеличение общего количества участков волоков объясняется фактическим расширением границ территории лесосеки в процессе укрупнения участков. В целом заметно увеличение количества участков с недопустимой и критической глубиной колеи, также волока проходят по непригодным для проезда местам.

В таблице представлены средние процентные отношения количества волоков с различным видом колеи в решениях, полученных при сравнении предложенных методов на 15 примерах.

Сравнение процентного отношения количества волоков с различным видом колеи в решениях

Колея	Предложенный алгоритм на гиперсети, %	Метод динамического программирования на графе, %
Недопустимо глубокая	4	5
Критическая	2	6
Глубокая	45	43
Рекомендуемая	49	46

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе впервые применен гиперсетевой подход для моделирования схемы трелевочных волоков на лесосеке. Проведение тестовых испытаний подтверждает получение лучших решений по сравнению с решениями, полученными на графовых структурах, благодаря большей гибкости гиперсетевых структур. Рассмотренная математическая модель и алгоритм позволяют решать задачу определения схемы волоков на лесосеке неправильной формы, с неравномерной плотностью произрастания леса, разными зонами устойчивости грунта и значительными перепадами высот, что часто встречается на практике.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Григорьев И. В. Снижение отрицательного воздействия на почву колесных трелевочных тракторов обоснованием режимов их движения и технологического оборудования. СПб.: СПбГЛТА, 2006. 236 с.
2. Попков В. К. Математические модели связности. Новосибирск: ИВМиМГ СО РАН, 2006. 490 с.
3. Попков В. К. Трудно решаемые задачи теории гиперсетей // Российская конференция «Дискретная оптимизация и исследование операций»: Материалы конф. (Владивосток, 7–14 сентября 2007). Новосибирск: Изд-во Ин-та математики, 2007. С. 69–73.
4. Попков В. К., Токтошов Г. Ы. Гиперсетевая технология оптимизации инженерных сетей в горной или пересеченной местности // Вестник Бурятского государственного университета. 2010. № 9. С. 40–44.
5. Салминен Э. О., Гуров С. В., Большаков Б. М. Размещение волоков на заболоченных лесосеках // Лесная промышленность. 1988. № 3. С. 3.
6. Токтошов Г. Ы. Сеточная аппроксимация элементов рельефа местности // Информатика и проблемы телекоммуникаций: Материалы. Росс. науч.-техн. конф. г. Новосибирск, 27–28 апреля 2009. Новосибирск, 2009. Т. 1. С. 23–24.

НАТАЛЬЯ ВЛАДИМИРОВНА ЛАУР

кандидат сельскохозяйственных наук, доцент кафедры лесного хозяйства лесотехнического факультета, Петрозаводский государственный университет
laur@psu.karelia.ru

АНАТОЛИЙ ПЕТРОВИЧ ЦАРЁВ

доктор сельскохозяйственных наук, профессор кафедры лесного хозяйства лесотехнического факультета, Петрозаводский государственный университет
tsarev@psu.karelia.ru

Рец. на кн.: Шегельман, И. Р. Лесная промышленность и лесное хозяйство : словарь / авт.-сост. И. Р. Шегельман. – 5-е изд., перераб. и доп. – Петрозаводск : Изд-во ПетрГУ, 2011. – 328 с.

В 2011 году в издательстве Петрозаводского государственного университета вышло пятое переработанное и дополненное издание словаря «Лесная промышленность и лесное хозяйство» (автор – профессор И. Р. Шегельман, рецензенты: доктор технических наук, профессор В. И. Пяткин, доктор технических наук, профессор А. В. Питухин), весьма значимого для специалистов лесного сектора страны.

Словарь представляет собой солидную объемную книгу, в которой обобщено и систематизировано несколько тысяч терминов и определений лесозаготовительной, целлюлозно-бумажной, лесопильной, деревообрабатывающей, лесохимической отраслей лесной промышленности и дендрологических, лесоводственных, лесовосстановительных и эколого-биологических направлений лесного хозяйства. В работе приведены термины и определения, относящиеся к лесному бизнесу, технике, технологии и организации заготовки, транспортировке и переработке древесного сырья, древесиноведению, учету и оценке лесных ресурсов, охране и защите лесов, хранению древесины, целлюлозно-бумажной промышленности и др.

Автор более 15 лет scrupulously работает над сбором, обобщением и систематизацией лесопромышленной и лесохозяйственной терминологии [1], [2] и др. В пятом издании словарь значительно расширен за счет включения современной терминологии по таким быстроразвивающимся направлениям науки, как лесная генетика и селекция.

В целом словарь заслуживает всяческого одобрения и распространения. Однако следует отметить некоторые из замеченных неточностей и описок. В частности, в нем указано, что каповая береза является формой березы повислой, в то время как это в основном форма березы пушистой (*Betula pubescens*). При определении понятия лесосеменных плантаций первого порядка в тексте допущена описка: вместо 50 клонов написано 50 %. Утверждение автора, что хвойные виды – это деревья и кустарники из группы семенных сосудистых растений, является довольно спорным, так как у хвойных растений сосуды отсутствуют, а их проводящую роль выполняют трахеиды. Есть и еще одно пожелание. Словарь – это книга не для разового использования, и поэтому он требует выносливого переплета, лучше тетрадного сшивного, а не клееного, и твердой обложки. Было бы желательно, чтобы при допечатке или переиздании данного словаря это было учтено.

Указанные замечания не снижают общей ценности словаря. Он представляет весомый вклад в развитие лесного хозяйства и лесной промышленности в стране и будет полезен широкому кругу специалистов лесного дела. Он будет также востребован у преподавателей, аспирантов, магистров, бакалавров, студентов вузов и техникумов лесного и лесопромышленного профиля, поскольку в конце наиболее значимых терминов, содержащихся в тексте статей, приведены комплексы тематически связанных терминов и определений, что позволит использовать словарь в качестве эффективного учебного пособия.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Шегельман И. Р. Бизнес-словарь лесной промышленности. СПб.: ПРОФИ-ИНФОРМ, 2005. 512 с.
2. Шегельман И. Р. Лесопромышленный словарь. Петрозаводск: Изд-во ПетрГУ, 1999. 200 с.



5 апреля 2012 года исполняется 75 лет доктору технических наук, профессору, президенту Петрозаводского государственного университета *Виктору Николаевичу Васильеву*.

ВИКТОР НИКОЛАЕВИЧ ВАСИЛЬЕВ К 75-летию со дня рождения

В. Н. Васильев родился в п. Кузьмолово Всеволожского района Ленинградской области. В 1960 году Виктор Николаевич после окончания средней школы № 25 г. Петрозаводска, работы на заводе «Авангард» и прохождения срочной службы в подводных силах Военно-морского флота СССР поступил на вечернее отделение лесоинженерного факультета. В 1967 году он начинает работать старшим преподавателем, а в 1972 году практически без отрыва от производства защищает в Ленинградском институте водного транспорта кандидатскую диссертацию. В 2002 году В. Н. Васильев защитил в Санкт-Петербургском институте информатики и автоматизации РАН докторскую диссертацию.

В 1978 году Виктор Николаевич – проректор по учебной работе, с 1991 по 2006 год – ректор ПетрГУ. За это время университет стал известен в России и за рубежом, а в 1997 году признан головным вузом системы МНО РФ на Европейском Севере России. В. Н. Васильев является научным руководителем Регионального центра информационных технологий Северного региона России. В 1993 году он избран действительным членом Международной академии информатизации. Большое внимание В. Н. Васильев уделял и продолжает уделять развитию студенческого программирования. Виктор Николаевич возглавлял оргкомитеты нескольких десятков международных конференций, он автор 243 научных трудов, в основном по вопросам информатизации и управления образованием. Он является председателем докторского диссертационного совета. По инициативе В. Н. Васильева на базе ПетрГУ создан Северо-Европейский открытый университет как консорциум высших учебных заведений Северной Европы и Северо-Запада России. Виктор Николаевич является членом Совета по грантам Президента РФ для молодых кандидатов и докторов наук и научным школам. С 2006 года В. Н. Васильев стал президентом университета, одной из главных обязанностей которого является разработка стратегии развития.

За заслуги в развитии международного сотрудничества В. Н. Васильев стал лауреатом премии Правительства России в области образования. Он награжден орденами Дружбы и орденом Почета, нагрудным знаком «Почетный работник высшего профессионального образования Российской Федерации», является заслуженным работником высшего образования России, заслуженным деятелем науки РК, почетным гражданином г. Петрозаводска и обладателем многих почетных грамот.

От всей души поздравляем Виктора Николаевича с юбилеем и желаем бодрости духа, оптимизма и новых свершений!



31 января 2012 года исполнилось 60 лет доктору медицинских наук, заведующему кафедрой госпитальной хирургии медицинского факультета ПетрГУ А. И. Фетюкову.

АЛЕКСЕЙ ИВАНОВИЧ ФЕТЮКОВ **К 60-летию со дня рождения**

В 1994 году А. И. Фетюков защитил кандидатскую, а в 2003 году – докторскую диссертацию. С его участием выпущено 5 учебных пособий, 11 учебно-методических изданий, опубликовано 136 научных работ. Он является председателем Карельского республиканского регионального отделения Общероссийской общественной организации «Российское общество хирургов», членом ученого совета медицинского факультета, диссертационного совета факультета, председателем учебно-методической комиссии медицинского факультета, членом учебно-методического совета университета, председателем экспертной комиссии ПетрГУ. Лауреат конкурса 100 лучших людей г. Петрозаводска, удостоен почетного звания «Заслуженный врач РК».



2 марта 2012 года исполнилось 75 лет доктору технических наук, профессору, действительному члену Российской академии жилищно-коммунального хозяйства, заведующему кафедрой водоснабжения, водоотведения и гидравлики строительного факультета ПетрГУ Р. И. Аюкаеву.

РЕНАТ ИСХАКОВИЧ АЮКАЕВ **К 75-летию со дня рождения**

Закончив Всесоюзный заочный политехнический институт (Москва) в 1964 году, Ренат Исхакович учился в аспирантуре и работал в Куйбышевском инженерно-строительном институте. В 1969 году защищает кандидатскую, а в 1981-м – докторскую диссертацию. С 1977 года работает в Петрозаводском университете на строительном факультете. По его инициативе в 1983 году на факультете создана специализированная кафедра водоснабжения, водоотведения и гидравлики и открыта новая специальность «Водоснабжение и водоотведение». Под руководством Р. И. Аюкаева успешно работает аспирантура. Р. И. Аюкаев автор более 100 печатных работ. Последние годы он успешно совмещает преподавательскую и научную работу с внедрением передовых технологий водоочистки в производственную практику промышленных и коммунальных предприятий.



24 марта 2012 года исполнилось 80 лет доктору медицинских наук, профессору кафедры фармакологии, организации и экономики фармации с курсами микробиологии и гигиены медицинского факультета ПетрГУ А. И. Шевченко.

АЛЕКСАНДР ИВАНОВИЧ ШЕВЧЕНКО **К 80-летию со дня рождения**

А. И. Шевченко окончил 1-й Ленинградский медицинский институт им. ак. И. П. Павлова в 1957 году и там же аспирантуру. В 1962 году он защитил кандидатскую диссертацию, докторскую – в 1972 году. С 1965 года работает на медицинском факультете Петрозаводского университета. В 1974–2007 годах возглавлял кафедру фармакологии и микробиологии; в 1987–1992 годах – медицинский факультет. Опубликовано более 200 печатных работ. А. И. Шевченко присвоены звания «Заслуженный деятель науки Карельской АССР», «Почетный работник высшего профессионального образования Российской Федерации».

От всей души поздравляем юбиляров и желаем им крепкого здоровья и новых профессиональных достижений!

ЕДИНЫЕ ТРЕБОВАНИЯ К РУКОПИСЯМ, ПРЕДСТАВЛЯЕМЫМ В ЖУРНАЛ

Публикации в журнале подлежат статьи, ранее не печатавшиеся в других изданиях.

Статья предоставляется в распечатанном виде на бумаге формата А4 (в двух экземплярах) и в электронном виде, на носителе или вложением в электронное письмо на адрес редакции журнала. Печатная версия статьи подписывается всеми авторами.

Статья набирается в текстовом редакторе Microsoft Word и сохраняется с расширением .doc. Объем оригинальной и обзорной статьи как правило не должен превышать 0,5–0,7 печатного листа, кратких сообщений, отчетов о конференциях и рецензий на книги – до 3 страниц. Поля: верхнее и нижнее – 2 см, правое и левое – 3 см. Абзацный отступ – 0,5 см. Шрифт: Times New Roman, размер – 14 пунктов, аннотация, список литературы – 12 пт, межстрочный интервал – полуторный. Нумерация страниц – справа внизу страницы.

Статья должна состоять из следующих элементов: названию статьи должен предшествовать индекс универсальной десятичной классификации (УДК) в левом верхнем углу. Далее через 1 интервал – название статьи жирным шрифтом заглавными буквами, название должно быть по возможности кратким, точно отражающим содержание статьи. Точка в конце названия статьи не ставится. Сведения об авторе (имя, отчество, фамилия автора (-ов) полностью; ученая степень и звание; место работы: вуз, факультет, кафедра; должность; электронный адрес и контактные телефоны). Аннотация (объемом 6–8 строк) на русском и английском языках, перед ней – название статьи и фамилия (-ии) автора (-ов) также на двух языках; ключевые слова от 3 до 8 слов (или словосочетаний, несущих в тексте основную смысловую нагрузку) также на двух языках. Все перечисленные элементы статьи отделяются друг от друга пустой строкой и печатаются без абзацного отступа через 1 интервал.

Основной материал статьи и цитат, приводимых в статье, должен быть тщательно выверен автором. Сокращения слов не допускается, кроме общепринятых сокращений химических и математических величин и терминов. Размерность всех физических величин следует указывать в системе единиц СИ.

Список литературы, примечания, комментарии и пояснения по тексту статьи даются в виде концевых сносок. Список литературы должен быть напечатан через одинарный интервал, на отдельном листе. Цитируемая в статье литература (автор, название, место, издательство, год издания и страницы (от и до или количество))

приводится в алфавитном порядке в виде списка в конце статьи (сначала отечественные, затем зарубежные. Фамилии иностранных авторов приводятся в оригинальной транскрипции). В тексте статьи ссылка на источник делается путем указания в квадратных скобках порядкового номера цитируемой книги или статьи, через точку с запятой – цитируемых страниц, если это необходимо. В книгах иностранных авторов, изданных на русском языке, после заглавия книги через двоеточие указывают, с какого языка сделан перевод. Выходные данные по статьям из журналов и сборников указывают в следующем порядке: фамилия (-ии) автора (-ов) с инициалами, название статьи, через две косые черты – название журнала (год, том, номер, страницы (от и до) или сборника (место издания, год, страницы (от и до))). По авторефератам – фамилия, инициалы, полное название автореферата, после которого ставят двоеточие и указывают, на соискание какой степени и в какой области науки защищена диссертация, место издания, год, страницы.

Таблицы – каждая печатается на отдельной странице, нумеруется соответственно первому упоминанию ее в тексте и снабжается заголовком. Таблицы должны быть предоставлены в текстовом редакторе Microsoft Word (формат .doc). В тексте следует указать место таблицы и ее порядковый номер.

Иллюстрации (рисунки, фотографии, схемы, диаграммы) нумеруются, снабжаются подписями и представляются в виде отдельных растровых файлов (в формате .tif, .jpeg), а в тексте рукописи указывается место, где они должны быть размещены. Для оригиналов (бумажная версия) на обороте каждой иллюстрации ставится номер рисунка, фамилия автора и пометка «верх», «низ». Каждый рисунок должен иметь название и объяснение всех кривых, цифр, букв и прочих условных обозначений, размещенных под ним. В тексте статьи должна быть ссылка на конкретный рисунок, например (рис. 1).

Статьи, поступившие в редакцию, обязательно рецензируются. Если у рецензентов возникают вопросы, статья возвращается на доработку. Редакция оставляет за собой право внесения редакторских изменений в текст, не искажающих смысла статьи.

Материалы, не соответствующие предъявленным требованиям, к рассмотрению не принимаются.

Решение о публикации принимается редакционной коллегией журнала.

CONTENTS

BIOLOGY

Shustov Yu. A., Belyakova E. N.

NUTRITION OF YOUNG SALMON FISH DURING AUTUMN FLOOD

Summary: Nutrition studies of the Atlantic salmon and bull-trout during autumn period in the streams and rivers of the Kola Peninsula revealed the 5–6 times decrease in the food items' consumption. Active nutrition of the young salmon and bull-trout during autumn floodings, followed by the sharp rise in the water level and increase in the river flow rate, is indicative of the advanced adaptive skills in salmon and bull-trout.

Key words: Atlantic salmon, bull-trout, young fishes, nutrition, flood flow, Kolskiy peninsula 7

Dzyubuk I. M., Klyukina E. A.

MORPHO-PHYSIOLOGICAL CHARACTERISTICS OF ONEGO LAKE-FEEDING SALMON (SALMO SALAR L.) OBTAINED BY USE OF STATISTICAL METHODS

Summary: Research results of the morpho-physiological characteristics of the lake-feeding salmon inhabiting Onego Lake (age, weight, length, height, fatness, gender, internal organ indexes) are presented in the article. The results were obtained with the use of the statistical analysis. Gender distinctions in salmon population were defined with the help of the stomach index. Distinctive differences in species coming from various habitats were determined by the use of the heart and stomach indexes. Consistent patterns of changes in the inner organs, independent upon gender and conditions of reproduction, were revealed.

Key words: Onego Lake, lake salmon, the morpho-physiological indicators, the componential analysis. 11

Reznichenko E. S., Gorbach V. V.

BUTTERFLY ASSEMBLAGES (LEPIDOPTERA, DIURNA) IN ECOSYSTEMS OF NORTHERN TAIGA OF KARELIA

Summary: The species composition and occurrence of butterflies were studied in the area near Kostomuksha during the four years of research (2007–2010). A total of 46 species were found in the study area. 587 butterflies of 42 species were observed during 518 counts at 74 sites. *Callophrys rubi*, *Nymphalis urticae* and *Vanessa cardui* were prevailing species. The most numerous butterfly assemblages were formed in meadows and numerically insignificant butterfly assemblages – in pine forests. Poor differentiation of butterfly population in northern taiga is indicated.

Key words: Northern taiga of Karelia, butterflies, spatial distribution of species, species composition and structure of assemblages 19

Shuiskaya E. A., Antipina G. S.

SYNANTHROPIC FLORA OF SOUTHERN KARELIA

Summary: High species variety of synanthropic flora (797 species) in Southern Karelia is shown. It was established that a native apophyte component (302 species) preserves taxonomical, biomorphological, geographical, and ecological parameters of the boreal flora. The indices of the alien component (495 species) are similar to the parameters of the flora in southern regions.

Key words: Synanthropic flora, native species, apophyte species, alien species, habitat, Southern Karelia 26

MEDICAL SCIENCE

Bukaley A. V., Vinogradova I. A.

ROLE OF EPIPHYSIS IN HUMAN BODY

Summary: The role and importance of the epiphysis in the human body in light of the contemporary scientific research are discussed. Data on the history of the study, anatomy, histology, and physiology of the epiphysis are presented in the article. The problems of the geroprotective and anticarcinogenic effects of melatonin and neuropeptides of the epiphysis are discussed. Their role in the regulation of the circadian rhythms in the human body and its antioxidant protection are considered.

Key words: Epiphysis, melatonin, circadian rhythms 31

Danilov G. P., Makejeva R. P., Shornikov V. A., Zilber E. K., Akopov A. L.

SURGICAL TREATMENT OF BRONCHIECTASIS IN PATIENTS OF ADVANCED AGE

Summary: The article is concerned with the surgical treatment experience of 38 patients (at the age of 45 years and older, up to 60 years) suffering from bronchiectasis. Both short-term and long-term postoperative outcomes were analyzed. It is shown that there are no contraindications to surgical treatment of the clinically meaningful localized bronchiectasis in patients over 45 years old. Surgical treatment should be viewed as a significant component of the complex treatment of the clinically meaningful localized bronchiectasis in senior patients.

Key words: Bronchiectases, lung resection, respiratory function. 37

Klyuchevsky V. V., Vvedensky V. P.

EFFECTIVENESS OF COMBINED BRONCHOSCOPY IN CORRECTION OF BRONCHIAL OBSTRUCTION IN PATIENTS WITH SEVERE CONCOMITANT INJURIES

Summary: Reliable improvement of the clinical, roentgenologic and endoscopic picture was achieved. The indices of the oxygen status indicative of the effectiveness of the fiber-optic bronchoscopy usage were obtained. The bronchoscopy incorporating high frequency artificial ventilation of the lungs is aimed at correcting bronchial obstruction of aspiration genesis in cases with severe concomitant injuries (n = 419).

Key words: Bronchial obstruction of aspiration genesis, high frequency ventilation of the lungs, fiber-optic bronchoscopy 42

Nikitin S. S., Kazak L. R., Shiryayeva A. N., Dolgova V. Yu., Shevchenko N. G., Chudetskaya S. A.

USE OF LABORATORY METHOD FOR ADRENOREACTIVITY DEFINITION IN CHILDREN WITH COMBINATIVE PELVIC DISORDER

Summary: The state of the vegetative nervous system, the research of which constitutes a certain difficulty, is of particular interest in cases of combinative pelvic disorder in children (hyperactive bladder and constipation). The laboratory method of the body adrenoreactivity definition, developed by I. G. Dlusskaya and R. I. Stryuk, was introduced and used together

with standard techniques. The given method was employed for the first time in the examination of the children. Standard indicators are offered. High level of the sympathetic nervous system activity in children with combinative pelvic disorder is revealed.

Key words: Children, hyperactive bladder, constipation, combinative pelvic disorders, adrenoreactivity 45

GEOSCIENCES

Filippov M. M., Deines Yu. E.

TRADITIONAL AND HEURISTIC APPROACHES TO INTERPRETATION OF GEOLOGICAL AND GEOPHYSICAL DEPOSITS IN LIGHT OF PERSPECTIVE SHUNGITE DEPOSITS' DISCOVERY

Summary: The article considers a hypothesis of the possible discovery of maksovit deposits in Tolvuiskaya syncline of Onego synclinore. Direct and indirect signs of diapir folds were revealed on the territory of "Tetyugino". The diapir model significantly increases the chances of finding shungite deposits. These types of folds have a set of genetic characteristic features.

Key words: Onega synclinore, shungites, maksovit, diapirs, genetic features 49

AGRICULTURAL SCIENCE

Mayorova A. S., Bolgov A. E.

FISH PRODUCT MARKET IN KARELIA

Summary: The modern condition and development prospects of the fishing industry and fish product market are analyzed. It was established that the dynamic growth of the fish industry in the Republic of Karelia contributes to the fish product expansion. The growth of the fish industry is also instrumental in meeting the demand of the population for this product, and in the decrease of the fish product import.

Key words: Fish-breeding, fish, cage trout breeding, fish production market, fish consumption 57

Matiuskkin V. A., Moshnikov S. A., Berdnikov I. A.

INFLUENCE OF MINERAL FERTILIZERS ON PRODUCTIVITY AND ACCUMULATION OF PHYTOMASS BY ARTIFICIAL PINE STANDS ON DRAINED MESOTROPHIC MIRES

Summary: The productivity of artificially cultivated pine stands on drained mires has increased by 29 % during 16 years of observations after fertilization. The height and diameter increment on the fertilized plot is much higher than on the control area. The annual increment of phytomass in the 31 year old stands is 2,5–3,5 – times higher than in the cultures growing on the undrained mires.

Key words: Drainage, peat deposit, forest stands, fertilizer, productivity, phytomass, carbon, leaf litter fall, timber fall 62

ENGINEERING SCIENCE

Borisov G. A., Kulin V. D.

EVOLUTIONARY ALGORITHM FOR OPTIMIZATION OF POWER DISTRIBUTION NETWORK

Summary: The evolutionary algorithm for solving Steiner's flow problem was proposed to optimize the power distribution network.

Key words: Evolutionary algorithm, Steiner's flow problem solution, optimization, distributive electricity networks 67

Kolesnikov G. N., Kuvshinov D. A.

FINITE-ELEMENT MODEL DECOMPOSITION

Summary: We propose a method of decomposition of the finite-element model of the mechanical system. In a physical sense, the model is viewed as a system of finite elements interacting in the nodes. The analysis of the elements' contact interaction in the nodes leads to the decomposition of the mathematical model. The mathematical model is presented as a system of linear algebraic equations.

Key words: Decomposition method, finite-element method, contact interaction. 71

Kosenkov A. Yu.

SYSTEMS OF HALF HIP ROOFS IN KAREILAN DWELLINGS AND CROSS BORDER REGIONS OF RUSSIAN NORTH

Summary: The article deals with the problem of half hip roofs as a consistent construction technique used to build the top of the building with dominant framework walls. These types of constructions were characteristic of national wooden architecture. An attempt is made to systemize a variety of the log gables of the roofs and to identify priority variants.

Key words: Wooden architecture, traditional construction methods, half hip roof, log gables. 73

Rochev A. A.

ANALYSIS OF FRAME SYSTEMS OF INELASTIC COMPOSITE ELEMENTS

Summary: We solved the problem of the deformation calculation for inelastic, plain, and statistically indeterminate frame systems. The systems consist of composite bars with variable transverse cross-section and variable stiffness of shear ties along the length. The solutions are based on A. R. Rzhansitsin's theory of composite rods. The deformation method and the expression for the determination of the equivalent modulus, earlier received by the author, were used.

Key words: Plain and statically indeterminate frame system, deformation calculation, equivalent modulus of deformation. 78

Tsypouk A. M., Eguipiti A. E.

HORIZONTAL ROOT UNDERCUTTER FOR FOREST TREE NURSERY

Summary: A design of the horizontal root undercutter for forest tree nurseries is presented in the article. The process of roots' excision is considered, the parameters of the working surface are determined.

Key words: Tree transplants, forest tree nursery, root undercutter, parameters of roots' excision. 81

Chetverikova I. V.

ANALYTICAL DEPENDENCES FOR JUSTIFICATION OF CONDITIONS FOR MULTIROWED RAFT RESHAPING

Summary: It is shown that the installation of the brake shield on the section-line of the multirowed raft is instrumental in reducing the time and route of the raft reshaping. To reshape the raft the tow vehicle should first make a turning maneuver. The above provided analytical dependences allow us to determine the setup parameters and brake shield sizes for the conditions of limited time and route for the raft reshaping.

Key words: Multirowed raft, reshaping, section-line, time, route, moment, angular acceleration. 85

PHYSICS AND MATHEMATICS

Molkov S. I.

INFLUENCE OF CAPILLARY WALLS' PROCESSES ON PLASMA PARAMETERS IN POSITIVE DISCHARGE COLUMN OF LOW PRESSURE

Summary: The influence of the secondary electron emission, the ion-induced electron, and photoemissions are analyzed. The thermalization of the atoms and ions on the capillary walls on the plasma parameters of the positive discharge column of low pressure are analyzed. The role of the degree of the surface roughness of the discharge capillary wall in the given processes is considered.

Key words: Low pressure Discharge, electron emission, roughness degree of the surface walls, plasma parameters 88

Sysun V. I., Ignakhin V. S.

ON RADIAL DRIFT THEORY OF IONIC CURRENT TO PROBE: II. ALLOWANCE FOR VOLUME IONIZATION IN PRESENCE OF COLLISIONS WITH ATOMS

Summary: The present work considers ionic current to spherical and cylindrical probes with allowance for ionization and collisions with atoms in the disturbed region of plasma. The expression describing the concentration of ions was obtained in the approximation of cold ions. The current-voltage characteristics of the probes were calculated for a wide range of parameters (probe size, ionization frequency, and ionic free path length). Some approximate expressions were obtained for probe current-voltage curves in the extreme case of a large (plane) and a small probe.

Key words: Probe diagnostic, low pressure plasma, radial drift theory, disturbed region, volume ionization 95

Khomichenko A. A., Fomin O. K.

RESEARCH OF KARELIAN SCHUNGITE ROCKS AND ANTHRAXOLITES BY PYROLYTIC MASS-SPECTROMY METHOD WITH SURFACE IONIZATION

Summary: The article is concerned with the results of the research experiment on the organic matter of schungites and anthraxolites from four Karelian deposits. The research was carried out with the help of pyrolytic mass-spectrometry method with surface ionization. Conclusions about the influence of the migration processes on the nature of the organic matter of schungites and anthraxolites are drawn. Results of the experiment are provided.

Key words: Pyrolytic mass-spectrometry, surface ionization, shungites, anthraxolites, organic matter 100

Ivanov A. V.

KATETOV'S CUBE THEOREM AND SEMINORMAL FUNCTORS

Summary: Assuming the Jensen's principle we constructed an example of nonmetrizable compact X with the following properties: for every seminormal functor F and $n \geq 2$ the space $F_n(X) \setminus F_{n-1}(X)$ is perfectly normal and $F_n(X)$ is hereditarily separable. In particular, for every $n \geq 2$ X^n is hereditarily separable and $X^n \setminus \Delta_n$ is perfectly normal, where Δ_n is the generalized diagonal of X^n .

Key words: Seminormal functor; Jensen's principle; Katetov's cube theorem; hereditary separability; perfect normality 104

Talbonen A. N., Rogov A. A.

ANALYSIS OF TYPEWRITTEN CAPTIONS IN DIGITAL HISTORICAL ALBUM

Summary: The article contains description of the basic approaches instrumental in constructing a search system for the highly specialized digital collection allowing for textual errors. The method is based on the image collection of the White Sea-Baltic Canal construction. The proposed techniques can be used in other projects related to historical documents' processing.

Key words: Image filtering, text recognition, morphological analysis, lexical analysis, search index 109

Voronova A. M., Voronov R. V., Piskunov M. A.

SKID TRAIL NETWORK SIMULATION BY MEANS OF HYPERNETWORK COVERED WITH WEIGHTED ROOTED TREE

Summary: The article is concerned with the description of the skid trail network on the cutting area. The analysis of the existing methods of solving the problem is carried out. A new approach to solving the hypernetwork problem is suggested. The two level mathematical model of the hypernetwork is presented. The solution algorithm of the problem of the minimum weighted rooted tree cover is considered.

Key words: Hypergraph, hypernetwork, rooted tree cover of hypernetwork, optimization, skid trail. 114

REVIEWS

Laur N. V., Tsarev A. P.

The book review: Shegelman I. R. Forest industry and forest management 118

JUBILATIONS

To the 75th Birthday Anniversary of V. N. Vasil'ev. 119

To the 60th Birthday Anniversary of A. I. Fetjukov

To the 75th Birthday Anniversary of R. I. Ajukaev

To the 80th Birthday Anniversary of A. I. Shevchenko 120

INFO FOR THE AUTHORS 121