
Министерство образования и науки
Российской Федерации

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

№ 4 (117). Июнь, 2011

Серия: Естественные и технические науки

Главный редактор

А. В. Воронин, доктор технических наук, профессор

Зам. главного редактора

Н. В. Доршакова, доктор медицинских наук, профессор

Э. К. Зильбер, доктор медицинских наук, профессор

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

член-корреспондент РАН

Н. В. Ровенко, кандидат филологических наук,

ответственный секретарь журнала

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

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

uchzap.petrSU.ru

Редакционный совет

- | | |
|---|---|
| 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. МУЛЛОНЕН
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)

№ 4 (117). June, 2011

Natural & Engineering Sciences

Chief Editor

Anatoly V. Voronin, Doctor of Technical Sciences, Professor

Chief Deputy Editor

Natalia V. Dorshakova, Doctor of Medical Sciences, Professor

Elmira K. Zilber, Doctor of Medical Sciences, Professor

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

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

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

The Editor's Office Address

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

Petrozavodsk, Republic of Karelia

E-mail: uchzap@mail.ru

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

- Коровушкин А. А., Поминчук Ю. А.
Использование различных методов формирования активного ила в очистных сооружениях крупных свиноводческих комплексов 7
- Лябзина С. Н.
Видовой состав и структура комплекса членистоногих-некробионтов Южной Карелии 10
- Мелехин А. В.
Дополнение к лишенобиоте Мурманской области 19
- Сергиенко Л. А., Рохлова Е. Л.
Изменение структуры приморских растительных сообществ побережий Белого моря в зависимости от субстрата 21
- Тыркин И. А., Щуров И. Л., Широков В. А., Ивантер Д. Э., Шустов Ю. А.
Лососинка: перспективы возрождения статуса лососевой реки 26
- Чурова М. В., Мецзякова О. В., Немова Н. Н.
Взаимосвязь активности ферментов энергетического обмена с темпами роста и размерами рыб 31

МЕДИЦИНСКИЕ НАУКИ

- Карапетян Т. А., Доршакова Н. В., Никитина К. А.
Современные возможности профилактики заболеваний, вызываемых *Streptococcus pneumoniae*, у населения разных возрастных групп 38
- Лотош Т. А., Юнаш В. Д., Виноградова И. А.
Влияние постоянного освещения на биомаркеры старения и продолжительность жизни у крыс-самцов 43
- Пащикова И. Г.
Сравнительная оценка антропометрических показателей и компонентного состава тела лиц юношеского возраста в Республике Карелии 49
- Топчиева Л. В., Рендаков Н. Л., Коломейчук С. Н., Гуров Э. В., Корнева В. А., Малышева И. Е.
Роль полиморфных вариантов гена апо-липпротеина Е в развитии сердечно-сосудистых заболеваний у жителей Республики Карелии 54

СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННЫЕ НАУКИ

- Ананьев В. А., Грабовик С. И.
Особенности формирования растительного покрова в среднетаежных коренных ельниках после сплошного ветровала 58
- Гаврилова О. И., Леонтьева Э. А.
О соотношении средних высот культур сосны и примеси березы на вырубках Карелии 64

- Еркюева А. А., Холопцева Е. С., Дроздов С. Н.
Некоторые аспекты свето-температурной характеристики сеянцев сосны обыкновенной Восточной Финноскандии 67

ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ

- Питухин Е. А., Чиклаев П. С.
Моделирование объема пиломатериалов с учетом сбеговой зоны ствола 71
- Подригало М. А., Клец Д. М., Немцев В. В.
Влияние разности коэффициентов сопротивления качению ведущих колес на устойчивость автомобиля против заноса . . . 76
- Шегельман И. Р., Будник П. В.
Обоснование вылета манипулятора и режимов работы валочно-трелевочно-процессорной машины 81

ФИЗИКО-МАТЕМАТИЧЕСКИЕ НАУКИ

- Жуков А. В., Гусев О. В.
Алгоритм фильтрации запросов к ресурсоемким web-сервисам на основе алгебраических соотношений 84
- Кириллов А. Н.
Моделирование управляемой динамики группы периодических варочных реакторов 89
- Плаксина Н. В.
Равновесные цены для провайдеров в системе с очередями 92
- Вапиров В. В., Сергеева О. В., Вапирова Н. В.
Исследование кинетики реакции гексахлорциклотрифосфата триена с О-нуклеофилами 95
- Сысун В. И., Игнахин В. С.
К радиальной теории ионного тока на зонд: I. Учет объемной ионизации 98

Всероссийская школа-семинар для молодых ученых России по теме «Проблемы и приложения электроразрядной обработки в индустрии наносистем и наноматериалов»

- Дятко Н. А.
Модификация поверхности полимерных пленок с помощью газоразрядной плазмы: методы характеризации поверхности и проблемы моделирования 103

Юбилей

- К 50-летию со дня рождения
Н. В. Доршаковой 113
- К 70-летию со дня рождения
В. В. Щипцова 114

Информация для авторов 115

Contents 116

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

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

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

Учредитель: ГОУ ВПО «Петрозаводский государственный университет»

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

Подписано в печать 15.06.2011. Формат 60х90 1/8. Бумага офсетная. Печать офсетная.
10 уч.-изд. л. Тираж 500 экз. (1-й завод – 155 экз.) Изд. № 146.

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

АЛЕКСЕЙ АЛЕКСАНДРОВИЧ КОРОВУШКИН

доктор биологических наук, профессор кафедры частной зоотехнии и кормления животных факультета ветеринарной медицины и биотехнологии, Рязанский государственный агротехнологический университет им. П. А. Костычева
university@rgatu.ru

ЮЛИЯ АЛЕКСАНДРОВНА ПОМИНЧУК

аспирант кафедры частной зоотехнии и кормления животных факультета ветеринарной медицины и биотехнологии, Рязанский государственный агротехнологический университет им. П. А. Костычева
university@rgatu.ru

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ РАЗЛИЧНЫХ МЕТОДОВ ФОРМИРОВАНИЯ АКТИВНОГО ИЛА В ОЧИСТНЫХ СООРУЖЕНИЯХ КРУПНЫХ СВИНОВОДЧЕСКИХ КОМПЛЕКСОВ

При формировании оптимальных условий для развития биоценоза активного ила в очистных сооружениях крупных свиноводческих комплексов необходимо акцентировать внимание на беспанцирных коловратках *Rotaria rotatoria* и *Philodina roseola*. Они осуществляют полное окисление загрязняющих веществ в застоявшихся иловых массах, что обеспечивает эффективность промышленного процесса аэробной биологической очистки, предотвращает нитчатое и гелевое вспухание активного ила.

Ключевые слова: биоценоз, пневматическая аэрация, активный ил, аэробная биологическая очистка, сточные воды, нитчатое и гелевое вспухание

В настоящее время метод очистки сточных вод активным илом является наиболее универсальным и широко применяемым при обработке стоков промышленных предприятий, однако, на наш взгляд, он недостаточно эффективно используется в сельскохозяйственной практике. Преимуществом биологической очистки с применением активного ила в очистных сооружениях являются относительно небольшие затраты, простота в использовании и экологичность данного метода. Сложность выбора состава биоценоза активного ила при очистке промышленных стоков предприятий связана с чрезвычайным разнообразием примесей, количество и состав которых постоянно изменяются вследствие появления новых производств и изменения технологии существующих.

В свиноводческих комплексах, как и в целом на сельскохозяйственных предприятиях, нет столь стремительной смены экотоксикантов, что облегчает работу с активным илом, так как его видовой состав может оставаться долгое время неизменным. Таким образом, целью работы было модифицировать методики аэробной биологической очистки сточных вод активным илом для применения их на свиноводческих комплексах.

С биологической точки зрения активный ил представляет собой в основном скопление бактерий в виде зооглеи, простейших и других, более высокоорганизованных представителей фауны (коловратки, черви, личинки насекомых, водные клещи). Кроме того, в нем присутствуют актиномикеты, водные грибы и дрожжи [2], [5].

Наиболее многочисленной группой являются бактерии. В определенных условиях возможно интенсивное развитие грибов. Знание групп бактерий, ведущих биохимическую очистку производственных сточных вод, дает возможность учитывать требования, предъявляемые микробами к условиям обитания в аэротенке, и позволяет создавать в последнем наиболее благоприятный режим очистки [4].

На сооружениях биологической очистки свиноводческого комплекса микроводоросли (диатомовые, зеленые, синезеленые, эвгленовые) активно работают во вторичных отстойниках. Там присутствует свет, что дает возможность развиваться автотрофным водорослям, принимающим активное участие в очистке сточных вод, поскольку они постоянно присутствуют и достигают массового развития в обрастаниях стенок отстойников [2].

Процесс биохимического разрушения органических загрязнений в аэротенках очистных сооружений свиноводческого комплекса происходит под воздействием биоконспекса активного ила. Основную роль при этом играют бактерии, обладающие способностью образовывать колонии. Микробиологические исследования составов биоценозов, структуры и процессов формирования флоккул активного ила в аэротенках свиноводческого комплекса показали, что развитие и характер зооглеи зависят от качества поступающей сточной жидкости и параметров процесса очистки [1], [3].

Биологическая очистка воды происходит в аэротенках, через которые проходит сточная

вода, содержащая органические загрязнения и активный ил. Для определения количественного состава активного ила применяли учет частоты встречаемости организмов-индикаторов, используя метод микроскопии в лаборатории нанотехнологий в растениеводстве и животноводстве РГАУ им. П. А. Костычева (2008 год). Тщательно перемешивали пробу, отбирали некалиброванные капли в объеме 0,1 см³. При учете использовали покровное стекло 24 × 24 мм. Просматривали 2–3 капли, в каждой по 10 полей зрения. Учет производили при увеличении 5 × 10.

Суспензию ила в сточной воде на протяжении всего времени нахождения в аэротенке подвергали аэрации воздухом. Интенсивная аэрация суспензии активного ила кислородом приводила к восстановлению его способности сорбировать органические примеси. Микрофлора и фауна биоценозов активного ила, обрабатывающих одинаковую сточную воду, в зависимости от уровня подачи кислорода и условий внешней среды идентична в качественном отношении, но отличается по соотношению организмов различных родов и видов (табл. 1).

При увеличении аэрации в аэротенках на открытом воздухе количество *Amoebin* возрастает с 9 до 13 %, коловраток – с 15 до 24 %, снижается количество свободноплавающих инфузорий (с 34 до 21 %) и инфузорий *Epistylis* (с 22 до 12 %). В аэротенках очистных сооружений, находящихся в помещении, наблюдается следующая тенденция: увеличивается количество *Amoebin* с 8 до 11 %, коловраток – с 19 до 25 %, количество свободноплавающих инфузорий снижается с 29 до 23 %, *Epistylis* – с 20 до 13 %. Аэрация позволила улучшить условия существования в данном биокомплексе и повысить эффективность молекулярного дыхания его аэробных представителей.

Снижение количества *Epistylis* на 10 % при изменяющихся и на 6 % при постоянных условиях среды, а также свободноплавающих инфузорий на 13 % при изменяющихся и на 7 % при постоянных условиях среды свидетельствует о снижении степени органического загрязнения в стоках, что вызвано усилением процессов окисления в результате увеличения аэрации.

Таким образом, при формировании оптимальных условий для развития активного ила в очистных сооружениях крупных свиноводческих комплексов необходимо акцентировать внимание на беспанцирных коловратках *Rotatoria rotatoria* и *Philodina roseola*, снижение количества которых является показателем недостатка кислорода и увеличения токсичных веществ в иловой смеси. При достаточном для их развития уровне кислорода, который обеспечивается использованием дополнительной аэрации, коловратки осуществляют полное окисление загрязняющих веществ в застаившихся иловых массах. Это обеспечивает эффективность промышленного процесса аэробной биологической очистки, предотвращает нитчатое и гелевое вспухание активного ила.

Итоговую оценку работы очистных сооружений проводили по таким показателям, как биологическое потребление кислорода (БПК), химическое потребление кислорода (ХПК), pH, t, °C и ряд других. При различных условиях внешней среды эти показатели могут меняться, так как отображают степень развития различных обитателей биоценоза активного ила, обеспечивающих качество биологической очистки. Ранее нами было рассмотрено соотношение гидробионтов в аэротенках открытого типа, находящихся в различных условиях внешней среды (аэротенки на открытом воздухе и в помещении комплекса очистных сооружений). Среднегодовые показатели биологически очищенной сточной воды в зави-

Таблица 1

Соотношение представителей биоценоза активного ила аэротенков в зависимости от уровня подачи кислорода и условий внешней среды

Показатели кислорода в аэротенках	Представители						Нематоды (<i>Nematoda</i>)
	Голые амебы (<i>Amoebin</i>)	Тихоходки (<i>Tardigrada</i>)	Инфузории			Коловратки (<i>Rotatoria rotatoria</i> , <i>Philodina roseola</i>)	
			Свободно- плавающие	<i>Epistylis</i>	<i>Vorticella</i>		
Средний показатель при изменяющихся условиях внешней среды (аэротенки на открытом воздухе), %							
Используемые предприятием	9	3	34	22	5	15	12
При дополни- тельной аэрации	13	5	21	12	8	24	17
Средний показатель при постоянных условиях внешней среды (аэротенки, находящиеся в закрытом помещении комплекса очистных сооружений), %							
Используемые предприятием	8	2	29	20	8	19	14
При дополни- тельной аэрации	11	3	23	13	9	25	16

симости от условий внешней среды меняются незначительно (табл. 2).

Таблица 2

Среднегодовые показатели биологически очищенной сточной воды в зависимости от условий среды

Средний показатель	t, °C	pH	Взвешенные вещества, мг/л	БПК, мг/л	ХПК, мг/л	Фосфор фосфатов Р, мг/л	Азот аммонийный N, мг/л	Азот нитритов N, мг/л	Азот нитратов N, мг/л	Растворенный кислород, мг/л
При изменяющихся условиях внешней среды	15	7,7	11,6	13	74,1	4,01	2,08	0,71	23,82	9,1
При постоянных условиях внешней среды	17,5	7,1	9,6	8,1	53,9	3,59	1,98	0,52	21,2	9,6

Наблюдается увеличение среднегодовой температуры воды с 15,0 до 17,5 °C, количества растворенного кислорода с 9,1 до 9,6 мг/л, снижение уровня pH с 7,7 до 7,1, что связано с относительным постоянством условий внешней среды и, следовательно, большей адаптивной способностью обитателей биоценоза активного ила.

Аэрация при формировании активного ила обеспечивает улучшение биоценоза. Однако на-

иболее перспективным, на наш взгляд, оказалось использование аэрации аэротенков, находящихся в относительно постоянных условиях внешней среды в помещении комплекса очистных сооружений. Такой метод делает возможным промышленный процесс аэробной биологической очистки в режиме продленной аэрации без накопления избыточной биомассы активного ила, о чем свидетельствует снижение разброса процентного соотношения представителей активного ила. Это обеспечивает увеличение трофических цепей в биоценозе активного ила, в ходе которого наблюдалось последовательное развитие популяций организмов с разными типами питания. Создаются оптимальные условия селективного развития и избирательного лизиса микроорганизмов.

В результате дополнительной аэрации прирост биомассы активного ила в экзогенный период цикла очистки компенсируется ее уменьшением в эндогенный период в результате самоокисления части биомассы. Этому способствует жизнедеятельность бактериофагов, паразитирующих бактерий и микроорганизмов-хищников. Значительно снижается выход избыточного активного ила. Обеспечивается возможность ведения процесса очистки без вывода избыточного ила.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Банина Н. Н. Оценка технологического процесса очистки воды по состоянию активного ила // Фауна аэротенков. Л.: Наука, 1984. С. 24–31.
2. Беляева М. А., Гюнтер Л. И. Биоценозы активных илов высоконагружаемых аэротенков и аэротенков с длительным периодом аэрации // Доклады Московского общества испытателей природы. 1967–1968. М., 1971. С. 88–90.
3. Жмур Н. С. Управление процессом и контроль результата очистки сточных вод на сооружениях с аэротенками. М.: Луч, 1997. 168 с.
4. Калужный С. В., Данилович Д. А., Кожевникова А. Н. Анаэробная биологическая очистка сточных вод // Итоги науки и техники. Сер. «Биотехнология». 1991. Т. 29.
5. Липеровская Е. С., Исаева Л. А., Логунова О. Е. Индикаторные организмы активного ила на сооружениях биологической очистки // Самоочищение и биоиндикация загрязненных вод. М.: Наука, 1980. С. 149–154.

СВЕТЛАНА НИКОЛАЕВНА ЛЯБЗИНА

кандидат биологических наук, доцент кафедры зоологии и экологии эколого-биологического факультета, Петрозаводский государственный университет
slyabzina@petrsu.ru

ВИДОВОЙ СОСТАВ И СТРУКТУРА КОМПЛЕКСА ЧЛЕНИСТОНОГИХ-НЕКРОБИОНТОВ ЮЖНОЙ КАРЕЛИИ

Изучен видовой состав некрофильных членистоногих Южной Карелии, насчитывающих 136 видов. Рассматривается структура комплекса, трофические связи некробионтов.

Ключевые слова: членистоногие-некробионты, некрофаги, трупы, редуценты, Карелия

Среди огромного числа членистоногих существует группа некробионтов, связанная с трупами. В процессе их деятельности происходит разложение мертвой органики до простых минеральных веществ, которые становятся доступными для других организмов. Кроме того, утилизируя гнилостные ткани, некробионты выполняют санитарную функцию. Полное разложение трупов в природных условиях происходит за счет деятельности целого комплекса организмов: микроорганизмов, плесневых грибов, водорослей, членистоногих и позвоночных-мусорщиков, но членистоногие являются самыми эффективными утилизаторами тканей.

Видовой состав членистоногих-некробионтов на трупах животных подробно рассмотрен в работах ряда авторов [14], [23], [33]. На севере Европейской части России изучение в целом комплекса некробионтов в наземных экосистемах ранее не проводилось. Имеются данные по энтомофауне трупов животных в Ленинградской области [11]; эти сведения касаются преимущественно отдельных групп насекомых и предназначены для практического применения в судебной медицине [17].

Цель работы состояла в изучении членистоногих-некробионтов Южной Карелии.

МАТЕРИАЛ И МЕТОДИКА

Место исследований

Работа проводится в весенне-осенние периоды с 2000 года в южных районах Карелии: Кондопожский район (биологическая станция ПетрГУ в с. Кончезеро, заповедник «Кивач»), Прионежский район (с. Лососинное), Сортавальский район (о. Ваалам) и окрестности г. Петрозаводска.

Исследования некрофильного комплекса проводили по общепринятым методикам, выкладывая трупы на поверхность почвы или помещая их в почвенные ловушки Барбера. В качестве ло-

вушек использовали банки объемом 0,5 л, дно которых присыпали землей и сверху укладывали трупы мелких животных (лягушки, птицы, землеройки). Это позволяло проследить весь цикл разложения и ограничивало вероятность утаскивания позвоночными. Приманки средних и крупных размеров позвоночных животных (массой до 20 кг) выкладывались на поверхность почвы, предварительно очищенной от растительности и дерна. Для снижения влияния приманок друг на друга их размещали на расстоянии более 100 м. Некрофильные насекомые имеют очень хорошо развитое обоняние: ориентируясь по запаху, жуки-некрофаги способны находить труп в радиусе до 90 м, а падальные мухи в лиственном лесу – на расстоянии 80 м [28]. Д. Вилсон и Дж. Фудже [36] рекомендуют располагать приманки на расстоянии не менее 90 м, а при использовании банки-ловушки с приманками – более 100 м.

Материал раскладывался в различных типах лесных (сосняки, ельники, березняки), открытых (влажноразнотравные, суходольные луга) биогеоценозов и в агроценозах.

Сбор насекомых производился общепринятыми методами: энтомологическим сачком, пробиркой и эксгаустером. Обследование и сбор материала осуществляли ежедневно в течение всего периода разложения. С крупной падали на последних стадиях до полной утилизации мягких тканей сбор проводился раз в неделю. Все наблюдения проводились в дневное время, когда отмечался наибольший пик активности животных.

Для идентификации видов двукрылых и жесткокрылых, связанных с трупом личинок их собирали и выращивали в лабораторных условиях по методике Е. Б. Виноградовой [4] на кусочках сырого мяса, печени или фрагментах тканей, взятых вместе с ними. Личинок собирали с различных участков трупа и почвенного слоя под ним.

При изучении разложения трупов в естественных условиях были проведены исследования по выявлению роли муравьев в утилизации мертвой органики. Трупы животных (рыжей полевки массой 35–40 г) выкладывали на различных участках: на верхушку наружного купола муравейника, самую оживленную тропу и вдалеке от муравейника. В этих экспериментах использовали как «свежие» трупы (менее 1 дня разложения), так и протухшие (с 9-дневным сроком) с сильным запахом.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Видовой состав некрофильных членистоногих

В наземных биоценозах на трупных приманках зарегистрированы 136 видов членистоногих из 9 отрядов 2 классов (табл. 1). Основу комплекса составляют отряд Жесткокрылые (78 видов) и отряд Двукрылые (43 вида). Численное преобладание двукрылых и жесткокрылых в комплексе отмечено во всех работах, рассматривающих комплекс, но в разных районах их роль как утилизаторов неодинакова. В засушливых местах и аридных районах основная роль принадлежит жесткокрылым и их личинкам [14], [16]. Напротив, в районах с избыточной влажностью (Европейская часть России, Дальний Восток) процесс разложения осуществляется главным образом за счет личинок двукрылых [11], [12].

Таблица 1

Состав некрофильных членистоногих

Класс, отряд	Количество семейств	Количество видов
кл. Паукообразные (Arachnida)		
отр. Пауки (Aranei)	1	1
отр. Паразитиформные клещи (Parasitiformes)	1	1
кл. Насекомые (Insecta)		
отр. Тараканы (Blattodea)	1	1
отр. Клещи (Hemiptera)	1	1
отр. Жесткокрылые (Coleoptera)	13	78
отр. Перепончатокрылые (Hymenoptera)	3	6
отр. Скорпионообразные мухи (Mecoptera)	1	1
отр. Чешуекрылые (Lepidoptera)	3	4
отр. Двукрылые (Diptera)	13	43
Всего	37	136

Среди жесткокрылых наибольшее число видов представлено сем. Коротконадкрылые жуки (Staphylinidae) – 29 видов (табл. 2). На трупах Staphylinidae преобладает не только по видовому составу, но и по численности. В большом количестве встречаются хищные виды *Philonthus succicola*, *Ph. marginatus*, *Ontholestes tessulatus*. Их численность зависит от обилия личинок дву-

крылых, которыми они питаются. Крупные виды (*Ontholestes* spp.) способны нападать на мелких падальных жуков и имаго двукрылых. В почве, пропитанной трупным соком, обильны мелкие сапрофаги *Omalium septentrionis*, *Megarhthrus denticollis*, *Proteinus brachypterus* и др.

Среди жесткокрылых имеется и специализированная группа некрофагов – семейство Мертвоеды (Silphidae). На трупных приманках отмечено 11 видов. Виды *Nicrophorus vespilloides*, *N. vespillo*, *N. invetstigator*, *Necrodes littoralis*, *Thanatophilus sinuatus*, *Th. rugosus*, *Oiceoptoma thoracica* распространены очень широко и зарегистрированы на всех приманках, другие – *Silpha carinata* и *S. tristis* – приурочены к открытым хорошо инсолированным участкам, но на падали отмечаются редко.

Жуки-могильщики активно питаются на трупах, здесь также проходит размножение жуков и развитие их личинок. Представители р. *Nicrophorus* обнаруживают трупы быстро, и в первые сутки на приманках мышей можно отловить в среднем до 10 особей, но из-за жесткой конкуренции остается только одна пара (более сильные самец и самка). Чтобы отложить яйца и ухаживать за своими личинками, могильщики могут зарывать небольшие трупы массой до 80 г и оставаться на них до окукливания личинок. Такое субсоциальное поведение характерно только для жуков-могильщиков и не отмечено у поверхностно-падальных мертвоедов этого семейства (родов *Necrodes*, *Thanatophilus*, *Oiceoptoma*, *Silpha*).

Семейство Карапузики (Histeridae) представлено 9 видами (табл. 2). На падали в большом числе встречаются имаго *Margarinotus cadaverinus*, *Saprinus semistriatus*, *S. immundus* и *S. planiusculus*. В районах исследования эти виды составляют основу некрофильных гистерид и обильны на всех трупах животных. Реже встречаются виды, которые отмечены как обитатели других эфемерных субстратов, такие как *Hister unicolor*, *Margarinotus ventralis*, обычные в навозе, *M. striola* – в грибах, и нидикольный вид *Gnathonus nanus*.

В течение всего периода разложения мягких тканей многочисленны мелкие падальные жуки семейства Leiodidae. *Catops nigrita* доминирует в еловых лесах, а *Sciodrepoides watsoni* – в сосновых и лиственных. Жуки, как правило, избегают открытых пространств, но последний вид может встречаться на низинных участках лугов. Жуки в массе присутствуют как на крупной, так и на мелкой падали, при этом больше предпочитают трупы с волосатым покровом.

Фауна Кожееда семейства Dermestidae небогата, на приманках отмечены три вида (табл. 2). Их присутствие зависит от влажности воздуха: в сухую погоду жуки могут встречаться как на «свежем» трупе, так и на последних стадиях его разложения, а при избыточной влажности они исчезают.

Таблица 2

Видовой состав и тип питания членистоногих, связанных с трупом

Царство Животные (Zoa) Раздел Билатеральные (Bilateria) П/раздел Первичноротые (Protostomia) тип Членистоногие (Arthropoda)		
Семейство	Вид	Тип питания
кл. Паукообразные (Arachnida)		
отр. Пауки (Aranei)		
Clubionidae	Clubiona sp.	зоофаг
отр. Паразитиформные клещи (Parasitiformes)		
Parasitidae	<i>Poecilochirus necrophori</i> * (Vitzthum, 1930)	зоофаг
кл. Насекомые (Insecta)		
отр. Тараканы (Blattodea)		
Blattellidae	<i>Ectobius lapponicus</i> (Linnaeus, 1758)	сапрофаг
отр. Клещи (Hemiptera)		
Pyrrhocoridae	<i>Pyrrhocoris marginatus</i> (Kolenati, 1845)	зоофаг
отр. Жесткокрылые (Coleoptera)		
Carabidae	<i>Pterostichus niger</i> (Schaller, 1783)	зоофаг
Hydrophilidae	<i>Cercyon crenatum</i> (Kugelann, 1794)	сапрофаг
	<i>C. impressus</i> (Sturm, 1807)	сапрофаг
	<i>C. lateralis</i> (Marsham, 1802)	сапрофаг
	<i>C. unipunctatus</i> (Linnaeus, 1758)	сапрофаг
	<i>Cryptopleurum minutum</i> (Fabricius, 1775)	сапрофаг
	<i>Megasternum obscurum</i> (Marsham, 1802)	сапрофаг
Histeridae	<i>Gnathonus nanus</i> (Scriba, 1790)	зоофаг
	<i>Hister unicolor</i> (Linnaeus, 1758)	зоофаг
	<i>Margarinotus cadaverinus</i> (Hoffmann, 1803)	зоофаг
	<i>M. striola</i> (Sahlberg, 1834)	зоофаг
	<i>M. ventralis</i> (Marseul, 1854)	зоофаг
	<i>Saprinus aeneus</i> (Fabricius, 1775)	зоофаг
	<i>S. immundus</i> (Gyllenhal, 1808)	зоофаг
	<i>S. planiusculus</i> (Motschulsky, 1849)	зоофаг
	<i>S. semistriatus</i> (Scriba, 1790)	зоофаг
	<i>Anisotoma humeralis</i> (Fabricius, 1792)	сапрофаг / некрофаг
Silphidae	<i>Catops coracinus</i> (Kellner, 1846)	сапрофаг / некрофаг
	<i>Catops neglectus</i> (Kraatz, 1852)	сапрофаг / некрофаг
	<i>Catops picipes</i> (Fabricius, 1792)	сапрофаг / некрофаг
	<i>Sciodrepoides watsoni</i> (Spence, 1815)	сапрофаг / некрофаг
	<i>Necrodes littoralis</i> * (Linnaeus, 1758)	некрофаг
	<i>Nicrophorus investigator</i> * (Zetterstedt, 1824)	некрофаг
	<i>N. vespillo</i> * (Linnaeus, 1758)	некрофаг
	<i>N. vespilloides</i> * (Herbst, 1783)	некрофаг
	<i>Oiceoptoma thoracica</i> * (Linnaeus, 1758)	некрофаг
	<i>Silpha carinata</i> * (Herbst, 1783)	сапрофаг / некрофаг
	<i>S. obscura</i> (Linnaeus, 1758)	сапрофаг / некрофаг
	<i>S. tristis</i> (Illiger, 1798)	сапрофаг / некрофаг
	<i>Thanatophilus dispar</i> * (Herbst, 1793)	некрофаг
	<i>Th. rugosus</i> * (Linnaeus, 1758)	некрофаг
	<i>Th. sinuatus</i> * (Fabricius, 1775)	некрофаг
Staphylinidae	<i>Aleochara curtula</i> (Goeze, 1777)	паразитоид
	<i>Atheta cadaverina</i> (Brisout, 1860)	сапрофаг
	<i>A. crassicornis</i> (Fabricius, 1792)	сапрофаг
	<i>A. subtilis</i> (Scriba, 1866)	сапрофаг
	<i>A. trinotata</i> (Kraatz, 1856)	сапрофаг
	<i>Creophilus maxillosus</i> * (Linnaeus, 1758)	зоофаг / некрофаг
	<i>Deliphrum tectum</i> (Paykull, 1789)	сапрофаг
	<i>Gyrophypnus fracticornis</i> (Miiller, 1776)	зоофаг
	<i>Megarhtrus denticollis</i> (Beck, 1817)	сапрофаг
	<i>M. nitidulus</i> (Kraatz, 1858)	сапрофаг

Продолжение табл. 2

	<i>Omalium rivulare</i> (Paykull, 1789)	сапрофаг
	<i>O. septentrionis</i> (Thomson, 1857)	сапрофаг
	<i>Ontholestes murinus</i> (Linnaeus, 1758)	зоофаг
	<i>O. tessulatus</i> (Geoffroy, 1785)	зоофаг
	<i>Oxytelus rugosus</i> (Fabricius, 1775)	зоофаг
	<i>Proteinus brachypterus</i> (Fabricius, 1792)	сапрофаг
	<i>Philonthus aeneus</i> (Rossi, 1790)	зоофаг
	<i>Ph. addendus</i> (Sharp, 1867)	зоофаг
	<i>Ph. albipes</i> * (Gravenhorst, 1802)	зоофаг
	<i>Ph. rotundicollis</i> (Menetries, 1832)	зоофаг
	<i>Ph. carbonarius</i> (Gravenhorst, 1802)	зоофаг
	<i>Ph. fimetarius</i> * (Gravenhorst, 1802)	зоофаг
	<i>Ph. marginatus</i> (Stroem, 1768)	зоофаг
	<i>Ph. nitidus</i> (Gravenhorst, 1802)	зоофаг
	<i>Ph. sanguinolentus</i> (Gravenhorst, 1802)	зоофаг
	<i>Ph. succicola</i> * (Thomson, 1860)	зоофаг
	<i>Ph. varians</i> (Paykull, 1789)	зоофаг
	<i>Tachinus laticollis</i> (Gravenhorst, 1802)	сапрофаг
	<i>T. lignorum</i> (Linnaeus, 1758)	сапрофаг
	<i>T. marginellus</i> (Fabricius, 1792)	сапрофаг
	<i>T. pallipes</i> (Gravenhorst, 1806)	сапрофаг
	<i>T. signatus</i> (Gravenhorst, 1802)	сапрофаг
Ptiliidae	<i>Acrotrichis parva</i> (Rosskothien, 1935)	сапрофаг
Scarabaeidae	<i>Aphodius rufipes</i> (Linnaeus, 1758)	сапрофаг / некрофаг
	<i>Geotrupes stercorarius</i> (Linnaeus, 1758)	сапрофаг / некрофаг
	<i>G. stercorosus</i> (Scriba, 1791)	сапрофаг / некрофаг
Dermestidae	<i>Anthrenus scrophulariae</i> (Linnaeus, 1758)	кератофаг
	<i>Dermestes ater</i> (Degeer, 1774)	кератофаг
	<i>D. murinus</i> (Linnaeus, 1758)	кератофаг
Cleridae	<i>Necrobia violacea</i> (Linnaeus, 1758)	кератофаг
Elateridae	<i>Prosternon tessellatum</i> (Linnaeus, 1758)	некрофаг
Nitidulidae	<i>Omosita depressa</i> * (Linnaeus, 1758)	кератофаг
	<i>O. colon</i> (Linnaeus, 1758)	кератофаг
	<i>Nitidula bipunctata</i> * (Linnaeus, 1758)	кератофаг
Cryptophagidae	<i>Atomaria sp.</i>	мицетофаг
отр. Перепончатокрылые (Hymenoptera)		
Apidae	<i>Vespula vulgaris</i> (Linnaeus, 1758)	зоофаг
Formicidae	<i>Formica polycetena</i> (Forster, 1850)	зоофаг / некрофаг
	<i>Lasius niger</i> (Linnaeus, 1758)	зоофаг / некрофаг
	<i>Myrmica rubra</i> (Linnaeus, 1758)	зоофаг / некрофаг
Braconidae	<i>Alysia manducator</i> * (Panzer, 1799)	паразитоид
отр. Скорпионозные мухи (Mecoptera)		
Panorpidae	<i>Panorpa communis</i> (Imhoff, Labram, 1845)	некрофаг
отр. Чешуекрылые (Lepidoptera)		
Tineidae	sp.	кератофаг
Nymphalidae	<i>Argynnis aglaja</i> (Linnaeus, 1758)	**
	<i>Limenitis populi</i> (Linnaeus, 1758)	**
Satyridae	<i>Erebia ligea</i> (Linnaeus, 1758)	**
отр. Двукрылые (Diptera)		
Phoridae	<i>Aneurinae unispinosa</i> * (Zetterstedt, 1838)	некрофаг
	<i>Megaselia sp.</i>	некрофаг
Dryomyzidae	<i>Neuroctena anilis</i> * (Fallén, 1820)	некрофаг
Sepsidae	<i>Nemopoda nitidula</i> * (Fallén, 1820)	некрофаг
Piophilidae	<i>Mycetaulus bipustulatus</i> (Fallén, 1823)	некрофаг
	<i>Parapiophila vulgaris</i> * (Fallén, 1820)	некрофаг
Helomyzidae	<i>Helomyza serrata</i> (Linnaeus, 1758)	некрофаг
	<i>Suillia inornata</i> (Loew, 1862)	некрофаг

Окончание табл. 2		
Sphaeroceridae	<i>Copromyza sp.</i>	некрофаг
	<i>Leptocera sp.</i>	некрофаг
	<i>Sphaerocera sp.</i>	некрофаг
Drosophilidae	<i>Drosophila busckii</i> * (Coquillett, 1901)	некрофаг
Chloropidae	<i>Stearibia nigriceps</i> * (Meigen, 1826)	некрофаг
Anthomyiidae	<i>Antomyia procellaris</i> (Rondani, 1866)	некрофаг
Fanniidae	<i>Fannia canicularis</i> * (Linnaeus, 1761)	некрофаг / зоофаг
	<i>F. coracina</i> * (Loew, 1873)	некрофаг / зоофаг
	<i>F. manicata</i> * (Meigen, 1826)	некрофаг / зоофаг
	<i>F. scalaris</i> * (Fabricius, 1794)	некрофаг / зоофаг
	<i>F. serena</i> * (Fallén, 1825)	некрофаг / зоофаг
Muscidae	<i>Hydrotaea borussica</i> (Stem, 1899)	некрофаг / зоофаг
	<i>H. dentipes</i> * (Fabricius, 1805)	некрофаг / зоофаг
	<i>Graphomyia maculata</i> * (Scopoli, 1763)	некрофаг / зоофаг
	<i>Muscina assimilis</i> * (Fallén, 1823)	некрофаг / зоофаг
	<i>M. pabulorum</i> * (Fallén, 1817)	некрофаг / зоофаг
	<i>Mydaea urbana</i> (Meigen, 1826)	некрофаг / зоофаг
	<i>Ophyra leucostoma</i> * (Wiedemann, 1817)	некрофаг / зоофаг
	<i>Orthellia caesarion</i> (Meigen, 1826)	некрофаг
Calliphoridae	<i>Lucilia caesar</i> * (Linnaeus, 1758)	некрофаг
	<i>L. illustris</i> * (Meigen, 1826)	некрофаг
	<i>L. silvarum</i> * (Meigen, 1826)	некрофаг
	<i>Calliphora loewi</i> (Enderlein, 1903)	некрофаг
	<i>C. subalpina</i> (Ringdahl, 1931)	некрофаг
	<i>C. uralensis</i> * (Villeneuve, 1922)	некрофаг
	<i>C. vomitoria</i> (Linnaeus, 1758)	некрофаг
	<i>C. vicina</i> * (Robineau-Desvoidy, 1830)	некрофаг
	<i>Cynomya mortuorum</i> * (Linnaeus, 1761)	некрофаг
	<i>Protophormia terraenovae</i> * (Robineau-Desvoidy, 1830)	некрофаг
Sarcophagidae	<i>Helicophagella melanura</i> * (Meigen, 1826)	некрофаг
	<i>Parasarcophaga albiceps</i> * (Meigen, 1826)	некрофаг / зоофаг
	<i>P. caerulea</i> * (Zetterstedt, 1838)	некрофаг / зоофаг
	<i>P. portchinskyi</i> * (Rohdendorf, 1937)	некрофаг / зоофаг
	<i>P. similis</i> * (Meade, 1876)	некрофаг / зоофаг
	<i>Pierretia socrus</i> (Rondani, 1860)	некрофаг

Примечание. * – личинки, выведенные с трупов в лабораторных условиях.

** – отмечено питание трупным соком.

Наоборот, в аридных условиях кожееды являются основными утилизаторами трупов и занимают доминирующее положение среди некробионтов [14]. Сухожилия и останки трупов перерабатываются кератофагами (семейства Cleridae, Nitidulidae). На приманках встречаются как взрослые жуки, так и их личинки (*Omosita depressa*, *O. colon*, *Nitidula bipunctata*, *Necrobia violacea*).

На крупной падали всегда присутствуют копробионты из скарабейд *Aphodius rufipes*, навозники *Geotrupes stercorosus*, *G. stercorarius*. Навозники делают неглубокие норки вблизи трупа или под ним, затаскивая туда части тканей или шерсть. По мнению Ю. Л. Абрамова [1], копрофагия у личинок и имаго некоторых видов навозников не является облигатным типом питания, и в определенных условиях они могут переходить к некрофагии. В лесах они также встречаются в гниющих плодовых телах грибов.

Довольно часто при избытке влажности трупы покрываются плесневыми грибами, что привлекает большое число мелких жуков мицето- и сапрофагов из семейств Cryptophagidae, Ptilidae, Hydrophilidae (табл. 2).

Основную роль в процессе деструкции органического вещества выполняют двукрылые и их личинки. В различных типах биоценозов зарегистрированы 43 вида некрофильных двукрылых из 13 семейств (табл. 2). Большая часть принадлежит семействам Calliphoridae (10 видов), Muscidae (8 видов) и Sarcophagidae (6 видов). Аналогичная картина некрофильного состава двукрылых отмечена для Средней и Северной Финляндии [25], [29]. Преобладание каллифорид в некрофильных комплексах характерно для зоны тайги и лесотундры. Например, на Южном Ямале основу некрофильного диптероидного комплекса составляют два семейства – Calliphoridae и Muscidae [2].

Комплекс некрофильных двукрылых в каждом биоценозе складывается соответственно условиям, характерным для данного биотопа. Повышенная инсоляция на открытых пространствах в летний период приводит к высыханию трупа и обеднению видового состава некробионтов. Высокая затененность в мелколиственном лесу не позволяет светолюбивым видам (*Graphomyia maculata*, *Muscina assimilis*) активно колонизировать трупы. Такие эврибионтные и обладающие высокой плодовитостью виды, как *Hydrotaea dentipes*, *Protophormia terraenovae*, *Parapiophilus vulgaris*, *Nemopoda nitidula*, активно заселяющие трупы в открытых биотопах, также являются основными утилизаторами и в лесах [9].

Встречаемость двукрылых на приманках различных животных различна. Мелкие трупы грызунов колонизируют мушки *Aneurina unispinosa* из семейства Горбатки (Phoridae), которые могут откладывать яйца на тушки, уже зарытые жуками-могильщиками. Представителей семейства Муравьевидок (Sepsidae) привлекают трупы, которые способны дольше сохранять влагу за счет волосанного покрова, замедляющего испарение, поэтому они чаще встречаются на крупных трупах млекопитающих и птиц.

Двукрылые активно колонизируют трупы во всех типах биоценоза, и главную роль в процессе утилизации принадлежит их личинкам. За период исследований из различных трупов выведены имаго 28 видов мух (табл. 2). В огромном количестве присутствуют личинки *Calliphora vicina*, *P. terraenovae*, *Lucilia caesar*, *Hydrotaea dentipes*, *Muscina assimilis*, *Fannia manicata*, *Helicophagella melanura*, *Parasarcophaga albiceps* и плодовых мушек *Drosophila busckii*. Их высокое обилие определяется и тем, что большинство видов являются полифагами и способны развиваться не только на трупах, но и в навозе, фекалиях и кухонных отбросах [5], [8].

Личинки разжижают ткани, выделяя секрет из пищеварительных желез, и питаются образовавшимся трупным бульоном. В период активного роста температура внутри трупа увеличивается за счет метаболического тепла до 30–35 °C (при температуре воздуха 23 °C, почвы – 19 °C) и поддерживается круглосуточно в течение нескольких дней. Это создает благоприятные микроклиматические условия, которые ускоряют развитие насекомых [4].

Для некрофильных двукрылых также характерна межвидовая конкуренция. Крупные мухи *Parasarcophaga spp.*, *Calliphora spp.* на трупах агрессивны и изгоняют более мелких двукрылых. Личинки некоторых родов *Fannia*, *Parasarcophaga*, *Muscina*, *Hydrotaea* сочетают некрофагию с хищничеством и уничтожают яйца и личинок других мух [8], [30].

В составе комплекса некрофильных членистоногих отмечены паразитоиды – *Alysia manducator* (отряд Перепончатокрылые) и *Aleo-*

chara curtula (отряд Жесткокрылые). Спектр паразитирования *A. manducator* довольно широк: они паразитируют на личинках двукрылых и некоторых коротконадкрылых жуков [27]. Самки способны откладывать яйца в личинок хозяев почти любого возраста, при этом у зараженных особей происходит изменение гормональной системы и метаморфоза, что необходимо для успешного завершения развития паразита [18]. Личинки жуков *Aleochara curtula* являются паразитами пупариев двукрылых. Пупарий поражает только одна личинка, которая начинает питаться содержимым, растет и для окукливания уходит в почву [31].

Почти все жуки приносят с собой на труп паразитиформных клещей *Poecilochirus necrophori*. Имеется две точки зрения на форетические отношения клещей с мертвоведами. Согласно первой из них, клещи уменьшают конкуренцию между жуками и личинками двукрылых, уничтожая последних. В эксперименте Спрингет [34] показал, что при отсутствии клещей пара жуков не могла дать никакого потомства, но если жуки вместе приносили 30 клещей, то клещи уничтожали все яйца падальных мух и потомство жуков выживало. Согласно второй точке зрения, клещи – паразиты жуков, которые поедают отложенные яйца своих хозяев и тем самым снижают их численность [35].

Структура комплекса некробионтов

При анализе комплекса членистоногих-некробионтов использована классификация, предложенная Брааком [20], которая основана на экологических связях отмеченных видов с трупом. Автор выделяет три группы:

1. **Облигатные некрофаги** – виды, специализирующиеся на падали, питание и развитие которых связано с трупами животных;

2. **Факультативные некрофаги** – виды, для которых трупные ткани являются дополнительным источником питания и местом развития личинок, и **факультативные некробионты** – виды, которых привлекает обилие насекомых, грибов, водорослей, связанных с разлагающимися тканями;

3. **Случайные посетители трупов.**

Группа облигатных некрофагов немногочисленна. Она включает жуков-могильщиков, мертвеедов, кожеедов и кератофагов (жуки семейств Cleridae, Nitidulidae и моли Tineidae). Их личинки развиваются исключительно на мертвых тканях и останках животных.

Самой многочисленной группой являются виды, **факультативно связанные с трупами**. Факультативная некрофагия отмечена у целого ряда насекомых и сочетается с основным типом питания у лесного таракана (*Ectobius lapponicus*), имаго и личинок шелкоунов (*Prosternon tessellatum*), хищника серого (*Creophilus maxillosus*), скорпионницы обыкновенной (*Panorpa communis*).

По мнению Б. М. Мамаева и др. [10], питаются мертвыми тканями, животные восполняют недостаток белковых веществ. Ко второй группе также относятся личинки некрофильных двукрылых, паразитоиды, мицетофаги, сапрофаги и зоофаги. Эти насекомые обладают широкой экологической пластичностью и могут встречаться и питаться в других разлагающихся субстратах (в грибах, гниющих растительных остатках, экскрементах человека и животных) [6], [13].

Состав третьей группы небогат, находки ее представителей на приманках единичны. Обилие доступной пищи привлекает некоторых зоофагов: пауков (*Clubiona* sp.), клопов (*Pyrrhocoris marginatus*), жукелиц (*Pterostichus niger*) и ос (*Vespa vulgaris*). Осы активно нападают как на небольших (*Fannia*, *Muscina*), так и на крупных мух (*Protophormia*, *Calliphora*), однако добычей чаще становятся двукрылые небольшого размера. Осы преимущественно встречаются на крупных трупах, но также находились на мышах [19]. Жукелицы могут уничтожать личинок могилищников и мертвоедов. В период активного разложения, когда сильно разжижены ткани, трупный сок может привлекать дневных чешуекрылых (ленточника тополевого *Limenitis populi*, перламутровку аглая *Argynnis aglaja*, чернушку лигея *Erebia ligea*).

Среди трофических групп наибольшую долю видов в комплексе составляют облигатные и факультативные некрофаги – 47 % (рис. 1). Они утилизируют основную массу трупа. Питаются тканями, некрофаги нарушают их целостность и создают благоприятные условия для проникновения и развития микроорганизмов, что приводит к ускорению процесса разложения.

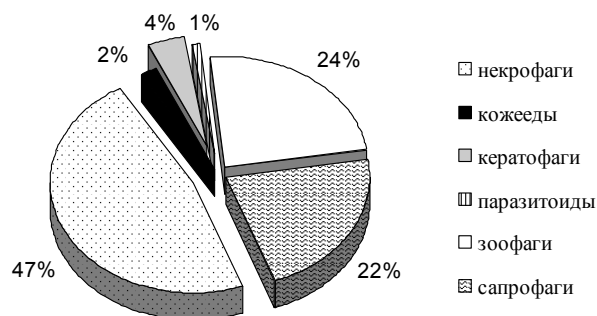


Рис. 1. Трофическая структура комплекса членистоногих-некробионтов

Около трети видового состава представлено зоофагами (24 %), которые регулируют численность некробионтов (особенно личинок двукрылых). Например, среднее количество яиц, отложенных мясной мухой *S. vicina* на труп мыши массой 25–35 г, составляет от 100 до 300, но в результате развивается не более 50, то есть 17 % [32]. Многие виды жесткокрылых и личинки двукрылых совмещают некрофагию с зоофагией (табл. 2).

На последних стадиях, а также весной и осенью разложение происходит за счет сапрофагов. Сапрофильный комплекс включает в себя почвенных беспозвоночных, потребляющих гниющую органику, питающихся водорослями и микроскопическими грибами [15]. Утилизация волос, перьев, рогов, костной ткани протекает медленно. Небольшой видовой состав и численность кератофагов и кожеедов не позволяют им самостоятельно полностью завершить этот процесс, и утилизация происходит с участием микроорганизмов [3], а также под воздействием абиотических факторов.

На трупах всегда присутствуют муравьи: на лугах и в агроценозах *Lasius niger*, *Myrmica rubra*, в хвойных лесах *Formica polyctena*, *F. aquilonia*. Трупы мышей, расположенные в 50 м от муравейника, муравьи-фуражиры *F. polyctena* обнаруживают в течение нескольких минут. Появление муравьев всегда приводит к резкому обеднению состава некробионтов и затягиванию всего процесса разложения в 2–3 раза. Муравьи уничтожают некрофильных личинок, могут нападать на имаго двукрылых и жуков, особенно легкая добыча для них – только что вышедшие мухи из пупариев.

Участие муравьев в разложении трупов отмечено многими авторами и учитываются в судебной медицине [21], [22], [24]. По литературным данным, некрофагия встречается и у других видов муравьев. Например, Кларк и Блом [23] отмечают питание трупами позвоночных животных у красных огненных муравьев (*Solenopsis invicta* Buren). В экспериментах по питанию *F. polyctena* также установлен факт некрофагии. Муравьи питаются как «свежими», так и сильно разложившимися трупными тканями. Трупы мышей, расположенные на муравьиной тропе, полностью перерабатываются муравьями в течение 5 дней (при температуре воздуха 18 °C), на куполе муравейника – за сутки. Муравьи либо заносят в муравейник волоски, кусочки тканей, либо обкладывают трупы хвоинками.

Сукцессия некробионтов

В процессе разложения происходит изменение состояния трупных тканей, которые вызывают смену населения трупа. Последовательно сменяя друг друга, некробионты осуществляют полное разложение и утилизацию мертвых тканей. Сукцессия наблюдается на всех трупах позвоночных животных, но более длительный период разложения крупной падали позволяет лучше проследить изменения в составе населения некробионтов и выделить основные этапы разложения.

Первыми трупы обнаруживают двукрылые Calliphoridae, жуки-могилищники Silphidae и мелкие падальные жуки Leiodidae (рис. 2). Двукрылых из семейств Mucidae, Fanniidae и Sarcophagidae привлекают слегка разложившиеся

ся трупы, но численность Calliphoridae при этом остается очень высокой. Обилие личинок двукрылых увеличивает присутствие зоофагов и паразитов (Histeridae, Staphylinidae, подсемейство Alysiina). Когда ткани сильно разжижены, на трупах среди двукрылых многочисленны Piorhilidae и Sepsidae. Последующие этапы характеризуются усилением активности жуков сапрофагов и кератофагов и снижением привлекательности трупа для двукрылых.

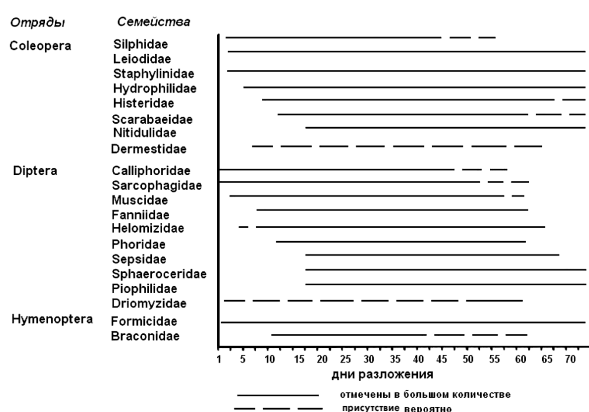


Рис. 2. Смена состава некрофильных насекомых в процессе разложения (в летнее время, масса трупа – 5 кг)

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В Южной Карелии на трупах животных зарегистрированы 136 видов некрофильных членистоногих из 9 отрядов 2 классов, в основном представители отрядов Жесткокрылые (78 видов) и Двукрылые (43 вида). На трупах развивается огромное количество личинок жуков из семейств Мертвоеды, Блестянки, Коротконодрылые, но основная часть тканей утилизируется двукрылыми. Из различных трупных приманок выведе-

ны имаго 28 видов двукрылых. Личинки массовых видов (*Protophormia terraenovae*, *Lucilia caesar*, *Hydrotaea dentipes*, *Nemopoda nitidula*, *Fannia manicata*, *Parasarcophaga albiceps*) участвуют в разложении во всех типах биоценоза.

Комплекс некробионтов состоит из трех групп. Первая группа – небольшое число **облигатных видов**, специализирующихся на падали кожеедов, кератофагов и некрофагов. Их питание и развитие тесно связано с трупами. Вторая группа **факультативных некрофагов и некробионтов** включает большое число членистоногих (47 %). Для них трупные ткани являются дополнительным источником питания и развития; также некробионтов привлекает обилие организмов, обитающих на разлагающихся останках. Третья группа – **случайные** посетители, которые не участвуют в разложении и не относятся к трупной фауне.

В комплексе некробионты представлены разнообразными трофическими группами (некро-, зоо-, керато-, сапрофаги, кожееды, паразитоиды), которые используют различные ткани трупа на разных стадиях разложения. Тем самым достигается наиболее полная утилизация. Некоторые некробионты сочетают основной тип питания с некрофагией. Например, рыжие лесные муравьи на трупах ведут себя как зоофаги, уничтожая личинок и имаго насекомых, как и некрофаги, способные утилизировать трупы мышей за короткий срок (24 ч).

БЛАГОДАРНОСТИ

Автор выражает искреннюю благодарность за помощь в определении и ценные советы А. Ю. Солодовникову (ЗИН РАН), А. В. Полевому (КарНЦ РАН), А. Л. Озерову (Зоомузей МГУ).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Абрамов Ю. Л. О некрофагии (*Corpus lunaris* L., Coleoptera: Scarabaeidae) // Зоологический журнал. 1968. Т. 47. № 8. С. 1251–1252.
- Басихин П. В., Петрова А. Д. Некрофильные двукрылые (Diptera) лесотундры Южного Ямала // Зоологический журнал. 1991. Т. 70. № 7. С. 68–72.
- Белова Э. В., Манучарова Н. А., Степанов А. Л., Полянская Л. М. Разложение хитина микробами в различных почвах // Почвоведение. 2006. № 9. С. 1082–1087.
- Виноградова Е. Б. Диапауза мух и ее регуляция // Труды Зоологического института АН СССР. 1991. Т. 214.
- Дербенева-Ухова В. П. Мухи и их эпидемиологическое значение. М.: Медгиз, 1952. 271 с.
- Кривошеина Н. П., Зайцев А. И., Яковлев Е. Б. Насекомые – разрушители грибов в лесах Европейской части СССР. М., 1986. 390 с.
- Лиховидов В. Е. О питании муравьев в период депрессии численности массовых видов вредителей в лесах Приамурья // Вопросы степного лесоведения. 1972. № 3. С. 84–87.
- Лобанов А. М. Потенциальная плодовитость, типы созревания и откладки яиц у мух семейства Fanniidae и Calliphoridae // Двукрылые насекомые. М.: МГУ, 1984. С. 58–69.
- Лябзина С. Н. Некрофильные двукрылые Южной Карелии и их участие в утилизации трупов животных // Вопросы популяционной экологии животных: Труды Петрозаводского государственного университета. Сер. «Биология». Вып. 2. Петрозаводск: Изд-во ПетрГУ, 2008. С. 101–109.
- Мамаев Б. М., Кривошеина Н. П., Потоцкая В. А. Определитель личинок хищных насекомых – энтомофагов стволовых вредителей. М.: Наука, 1977. 392 с.
- Марченко М. И. Влияние климатических факторов на продолжительность биологического разложения трупа насекомых-некробионтами в условиях Северо-Запада Европейской части России // Энтомологическое обозрение. 1992. Т. 63. № 4. С. 557–568.

12. Озеров А. Л. К изучению некробионтных двукрылых Дальнего Востока СССР // Насекомые в экосистемах Сибири и Дальнего Востока. М.: МГУ, 1989. С. 114–142.
13. Псарёв А. М. Трофические группировки копробионтных насекомых пастбищ горного Алтая // Зоологический журнал. 2001. Т. 80. № 12. С. 1523–1527.
14. Пушкин С. В. Некробионтный энтомокомплекс высокогорий Северо-Западного Кавказа // Евразийский энтомологический журнал. 2004. Т. 3. № 3. С. 195–202.
15. Стриганова Б. Р. Питание почвенных сапрофагов. М.: Наука, 1980. 243 с.
16. Цеденова Л. У., Сальникова В. Э. Зависимость видового состава жуков-некрофагов от давности трупа // Животный мир Калмыкии, его охрана и рациональное использование. Элиста, 1982. С. 135–138.
17. Чайка С. Ю. Судебная энтомология: Учеб. пособие. М.: Макс Пресс, 2003. 60 с.
18. Черногуз Д. Г. Эффект блокирования метаморфоза мух при паразитировании *Alysia manducator* Panzer (Hymenoptera, Braconidae) // Труды Всесоюзного энтомологического общества. Общая энтомология. Л.: Наука, 1986. С. 114–119.
19. Archer M. S., Elgar M. A. Effects of decomposition on carcass attendance in a guild of carrion-breeding flies // Medical and Veterinary Entomol. 2003. Vol. 17. P. 263–271.
20. Braack L. E. O. Community dynamics of carrion-attendant arthropods in tropical African woodland // Oecologia. 1987. Vol. 72. № 3. P. 402–429.
21. Campobasso C., Marchetti D., Introna F., Colonna M. Postmortem artifacts made by ants and the effect of ant activity on decomposition rates // Am. J. Forensic Med. Pathol. 2009. Vol. 30. № 1. P. 84–87.
22. Chin Heo C., Marwi M., Hashim R., Abdullah N., Dhang C., Jeffery J., Kurahashi H., Omar B. Ants (Hymenoptera: Formicidae) associated with pig carcasses in Malaysia // Tropical Biomedicine. 2009. Vol. 26. № 1. P. 106–109.
23. Clark W. H., Blom P. E. Observations of ants (Hymenoptera: Formicidae: Myrmicinae, Formicinae, Dolichoderinae) utilizing carrion // Southwest. Natur. 1991. Vol. 36. № 1. P. 140–142.
24. Devinder S., Bharti M. Ants (Hymenoptera: Formicidae) associated with decaying rabbit carcasses // Uttar Pradesh J. Zool. 2001. Vol. 21. P. 93–94.
25. Hanski I. Carrion fly community dynamics: patchiness, seasonally and coexistence // Ecol. Entomol. 1987. Vol. 12. P. 257–266.
26. Kimberly L. T., Richard D. F., Carlyle C. B. Insect fauna visiting carrion in Southwest Virginia // Forensic Science Inter. 2005. Vol. 150. P. 73–80.
27. Laing J. Host-Finding by Insect Parasites. 1. Observations on the Finding of Hosts by *Alysia manducator*, *Mormoniella vitripennis* and *Trichogramma evanescens* // J. Animal Ecol. 1937. Vol. 6. № 2. P. 298–317.
28. Macleod J., Donnelly J. Natural feature and blowfly movement // J. Animal Ecol. 1960. Vol. 29. № 1. P. 85–93.
29. Nuorteva P. Local distribution of blowflies in relation to human settlement in an area around the town of Forsa in South Finland // Ann. Entomol. Fenn. 1966. Vol. 32. P. 128–137.
30. Pape T. The Sarcophagidae (Diptera) of Fennoscandia and Denmark // Fauna Entomol. Scandinav. Leiden. Copenhagen, 1987. Vol. 19.
31. Peschke K. Chemical traits in sexual selection of the rove beetle, *Aleochara curtula* (Coleoptera: Staphylinidae) // Entomologia Generalis, 1990. Vol. 15. P. 127–132.
32. Putman R. J. Dynamics of blowfly *Calliphora erythrocephala* within carrion // J. Animal. Ecol. 1977. Vol. 46. P. 853–866.
33. Reed H. B. A study of dog carcass communities in Tennessee with special reference to the insects // Am. Midland Naturalist. 1958. Vol. 59. P. 213–245.
34. Springett B. P. Aspect of the relationship between baring beetles *Necrophorus* spp. and the mite *Poecilochirus necrophori* Vitz. // J. Animal. Ecol. 1968. Vol. 37. P. 417–424.
35. Wilson D. S., Knollenberg W. G. Adaptive inderects: the fitness of burying beetles with and without their phoretic mites // Evol. Ecol. 1987. Vol. 1. P. 139–159.
36. Wilson D. S., Fudge J. Burying beetles: intraspecific interaction and reproductive success in the field // Ecol. Entomol. 1984. Vol. 9. P. 195–203.

АЛЕКСЕЙ ВАЛЕРЬЕВИЧ МЕЛЕХИН

младший научный сотрудник лаборатории флоры и растительных ресурсов Полярно-альпийского ботанического сада-института им. Н. А. Аврорина, Кольский научный центр РАН (г. Апатиты)
lichenoid@yandex.ru

ДОПОЛНЕНИЕ К ЛИХЕНОБИОТЕ МУРМАНСКОЙ ОБЛАСТИ

В статье приводятся 6 новых для Мурманской области видов лишайников (*Buellia vilis*, *Caloplaca concilians*, *Dimelaena oreina*, *Lichenothelia scopularia*, *Microcalicium ahlneri*, *Pilophorus dovrensis*).

Ключевые слова: лишайники, новые виды, Мурманская область

ВВЕДЕНИЕ

Лишайники – самый многочисленный (по числу видов) компонент автотрофной биоты Мурманской области, которая относится к числу наиболее хорошо изученных регионов России в отношении лишайников. К концу XX века было довольно полно выявлено видовое разнообразие макролишайников. Начало XXI века характеризуется интенсивным изучением накипных микролишайников, в результате чего список лишайников области увеличился почти на четверть. Согласно последнему каталогу лишайников, лишайнофильных и близких к ним грибов Мурманской области «Catalogue of lichens and allied fungi of Murmansk Region, Russia», в регионе насчитывается 1139 видов [5], причем более 100 – паразитические и сапротрофные грибы. Уже через два года в обзоре разнообразия лишайников Мурманской области Г. П. Урбанавичюс [2] приводит 1175 видов. Он же отмечает, что лишайнофлора области выявлена в настоящее время только на 75 % от предполагаемого разнообразия [2].

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Изучение образцов из коллекций, собранных в экспедициях 2006, 2008, 2009 годов, позволило дополнить список лишайников области; часть этих находок опубликована [1], [3]. Данные о шести видах приводятся в настоящей статье.

Сбор и идентификация образцов проводились по стандартным методикам. Сделаны краткие описания участков растительности и детальные описания местообитания видов. Координаты мест сбора определялись с помощью GPS.

Данные об образцах внесены в разработанную нами систему управления интегрированными наблюдениями, гербарными, графическими, географическими и литературными данными, доступную в сети Интернет (<http://phpmobotan.ru/allsystem2>). Все образцы лишайников хранятся в гербарии Полярно-альпийского ботанического сада-института Кольского научного центра РАН (КРАВГ).

© Мелехин А. В., 2011

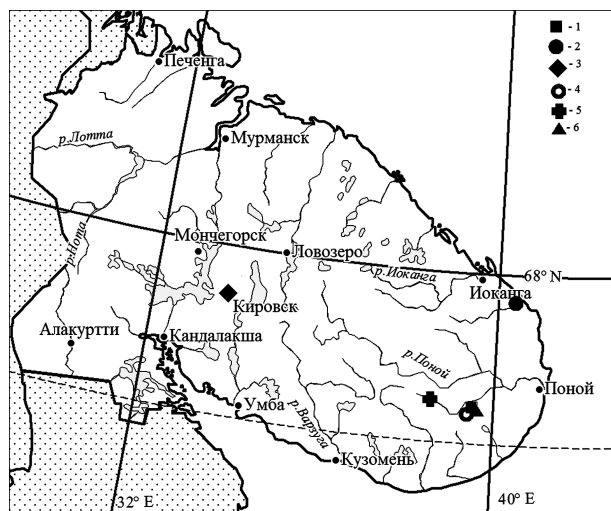
РЕЗУЛЬТАТЫ

В приводимом ниже списке виды расположены по алфавиту, названия даются по R. Santesson et. al [4]. После названия для каждого таксона указываются координаты и высота над уровнем моря, административное и географическое положение (см. рисунок), положение в рельефе, местообитание, параметры состояния микроместообитания (субстрат, освещенность, увлажненность, ориентация плоскости поверхности субстрата), дата сбора, сопутствующие виды, общее распространение.

1. *Buellia vilis* Th. Fr. – 66°57'45" с. ш., 39°50'36" в. д., 160 м над уровнем моря. Ловозерский район. Основание поросшей березняком скалы в долине р. Пурнач. На камне хорошо освещенной сухой вертикали, под козырьком, в 2 м от скального уступа (05.07.2009). Сопутствующие виды: *Rhizocarpon grande* (Flörke) Arnold, *Rhizocarpon geminatum* Körb., *Physcia caesia* (Hoffm.) Fűrnr., *Lecanora polytropa* (Ehrh. ex Hoffm.) Rabenh., *Phaeophyscia sciastra* (Ach.) Moberg. Общее распространение: в России – Новая Земля, Ямал, Чукотка.

2. *Caloplaca concilians* (Nyl.) H. Olivier – 67°50'37" с. ш., 40°16'31" в. д., 8 м над уровнем моря. Ловозерский район. Побережье Лумбовского залива Белого моря. Устье р. Западная. Скалы берега водопада на границе с морем, среди березового пойменного криволесья. На камне периодически затопляемой хорошо освещенной горизонтали глыбы в 0,1–0,5 м от уреза воды (06.07.2007). Общее распространение: в России – Новая Земля.

3. *Dimelaena oreina* (Ach.) Norman – 67°41'00" с. ш., 33°40'00" в. д., 400 м над уровнем моря. Кировский район. Хибины. Склон южной экспозиции г. Поачвумчорр (южная оконечность). Пояс березового криволесья. На кальцийсодержащем камне сухой и хорошо освещенной вертикали основания скалы, в 3 м от уровня осыпи (05.06.2006). Широко распространен в России.



Местонахождения видов лишайников, новых для Мурманской области: 1 – *Buellia vilis* Th. Fr.; 2 – *Caloplaca concilians* (Nyl.) H. Olivier; 3 – *Dimelaena oreina* (Ach.) Norman; 4 – *Lichenothelia scopularia* (Nyl.) D. Hawksw.; 5 – *Microcalicium ahlneri* Tibell; 6 – *Pilophorus dovrensis* (Nyl.) Timdal, Hertel et Rambold

4. *Lichenothelia scopularia* (Nyl.) D. Hawksw. – 66°51'57" с. ш., 39°25'25" в. д., 200 м над уровнем моря. Ловозерский район. Берег р. Пурнач между устьями рек Западная и Восточная Тандра. Валунно-песчаный подмываемый берег в береговом кривоoleyе. На окатанном камне, лежащем на песке (02.07.2009). Общее распространение: Европа.

5. *Microcalicium ahlneri* Tibell – 66°54'13" с. ш., 38°17'05" в. д., 230 м над уровнем моря. Ловозерский район. Плакор холма в долине оз. Пурнач, в 1 км на север от северного берега. Елово-березовый лес. На толстой коре ствола живой старой ели, в 2 м от земли (22.06.2009). Сопутствующие виды: *Chaenotheca trichialis* (Ach.) Th. Fr., *Cyphelium karelicum* (Vain.) Räsänen. Общее распространение: в России – Республика Карелия, Республика Коми; в мире – Европа.

6. *Pilophorus dovrensis* (Nyl.) Timdal, Hertel et Rambold – 66°57'45" с. ш., 39°50'36" в. д., 160 м над уровнем моря. Ловозерский район. Основание скалы на берегу р. Пурнач. На камне хорошо освещенной сухой горизонтальной поверхности, в 2 м от уреза воды (05.07.2009). Общее распространение: в России – Архангельская область, Таймыр, Чукотка; в мире – Европа, Северная Америка.

БЛАГОДАРНОСТИ

Автор выражает благодарность Кольскому центру охраны дикой природы в лице В. Н. Петрова за организацию экспедиций в районы Лумбовского залива и р. Пурнач; признателен рецензентам и коллегам за внимательное прочтение рукописи.

Исследования частично выполнены при финансовой поддержке программы фундаментальных исследований Президиума РАН «Биоразнообразие и динамика генофондов».

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Мелехин А. В. Новые для России и Мурманской области лишайники из Лапландского заповедника // Ботанический журнал. 2009. Т. 94. № 2. С. 289–292.
2. Урбанавичус Г. П. Биогеографический обзор разнообразия лишайников Мурманской области // Вестник Кольского научного центра РАН. 2009. № 1. С. 16–18.
3. Melechin A. V. Stereocaulon leucophaeopsis and S. tornense new to Russia from the Murmansk region // Graphis Scripta. 2010. Vol. 22. P. 63–64.
4. Santesson R., Moberg R., Nordin A., Tønsberg T., Vitikainen O. Lichen-forming and lichenicolous fungi of Fennoscandia. Uppsala, 2004. 359 p.
5. Urbanavichus G., Acht T., Urbanavichene I. Catalogue of lichens and allied fungi of Murmansk Region, Russia // Norrlinia. 2008. Vol. 17. P. 1–80.

ЛЮДМИЛА АЛЕКСАНДРОВНА СЕРГИЕНКО

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

ЕЛЕНА ЛЕОНИДОВНА РОХЛОВА

студентка 5-го курса эколого-биологического факультета, Петрозаводский государственный университет
abdomen@mail.ru

ИЗМЕНЕНИЕ СТРУКТУРЫ ПРИМОРСКИХ РАСТИТЕЛЬНЫХ СООБЩЕСТВ ПОБЕРЕЖИЙ БЕЛОГО МОРЯ В ЗАВИСИМОСТИ ОТ СУБСТРАТА

В статье представлены материалы по изучению влияния дренажа местообитания на структуру сообществ приморских сосудистых растений побережья Белого моря. Выявлено, что в сообществах с неудовлетворительным дренажем доминируют толерантные к засолению виды, а в сообществах со слабым дренажем доминируют эвгалофиты.

Ключевые слова: приморская полоса, галофиты, дренаж, толерантность

Галофитный флористический комплекс побережий Российской Арктики, существующий в контактной зоне суша – океан и выделенный на основе эколого-ценотического оптимума слагающих его видов [1], [6], [7], [11], находится в сложных абиотических условиях, поскольку направленное развитие физико-географической среды является одним из движущих факторов его эволюции. Исследование взаимосвязей и соотношений между факторами внешней среды и структурной организацией флористического комплекса актуально в целях познания взаимоотношений между популяциями растений и той жизненной обстановкой, на фоне которой они существуют [3], [7], [8], [9].

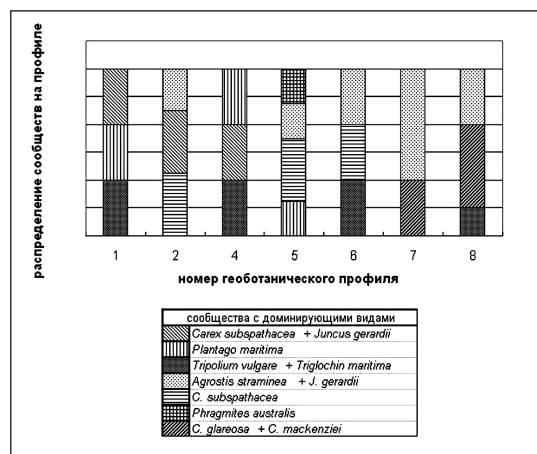
МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Исследования приморской флоры и растительности проводились в июле 2010 года в окрестностях п. Колежмы, Беломорский район, Республика Карелия (устье р. Колежмы, о. Лопский). Описывались типичные для данной местности участки приморской растительности в зоне литорали и супралиторали методом геоботанических профилей [5], [7], [9], [10], заложенных перпендикулярно к берегу моря длиной 25–30 м, с последовательно расположенными пробными площадями размером 1 м² в естественных контурах с учетом элементов микрорельефа (кочки, скальные выходы, микропонижения), удаления от линии уреза воды (см. рисунок).

Для видов указывалось проективное покрытие (%) по Друде, обилие вида в баллах, фенофаза по В. А. Алехину, высота растений и ярусность. Геоботанические профили закладывались на основе отличий экотопов по степени увлажнения (дренаж подстилающего субстрата). Степень дренажа определялась по шкале [6]:

© Сергиенко Л. А., Рохлова Е. Л., 2011

1 балл – дренаж неудовлетворительный, застойное переувлажнение сохраняется в течение ряда лет; 2 балла – очень слабый дренаж, местообитания с застойным переувлажнением в течение всего вегетационного периода во влажные годы; 3 балла – довольно слабый дренаж, застойное переувлажнение сохраняется значительную часть вегетационного периода; 4 балла – слабый дренаж, застойного переувлажнения нет, наблюдается периодическое переувлажнение в результате таяния снегов и выпадения дождей, разливов рек и морских приливов.



Распределение сообществ с доминирующими видами на геоботанических профилях.
1–8 – геоботанические профили

Характеристика профилей

Первый профиль – основной субстрат – легкий суглинок с гравием, дренаж – 3 балла. Микрорельеф в виде небольших кочек (диаметр – 15–20 см). Общее проективное покрытие растительности (ОПП) – 90 %, доминанты (10 – 15 %) –

Plantago schrenkii, *P. maritima*, *Carex subspathacea*, *Triglochin maritima*, *Glaux maritima*, содоминанты (2–5 %) – *Tripolium vulgare*, *Spergularia marina*. Ближе к лесу и к дороге в понижении отмечены (20–40 %) *Alopecurus arundinaceus*, *Phragmites australis*.

Второй профиль – основной субстрат – легкий суглинок с песком, дренаж – 2 балла. Микрорельеф не выражен, на обсыхающих пониженных местах характерен налет зеленой водоросли *Enteromorpha* sp. ОПП растительности – 80 %, доминанты (20–35 %) – *Carex subspathacea*, *Plantago maritima*, *Agrostis straminea*, *Tripolium vulgare*, содоминанты (2–5 %) – *Atriplex nudicaulis*. Ближе к лесу и к дороге отмечены (20–40 %) *Juncus gerardii*, *Festuca rubra*.

Третий профиль расположен на перемычке – «томболо», соединяющей о. Лопский с коренным берегом. Основной субстрат – средний суглинок с выпотами солей на поверхности; характерно «растрескивание» верхнего почвенного горизонта. Дренаж – от 1 до 3 баллов. Выражена мозаичность растительного покрова. ОПП – 60 %, доминанты (50–70 %) – *Plantago maritima* (gr), *Carex subspathacea* (gr), содоминанты (5–7 %) – *Atriplex nudicaulis*, *Glaux maritima*. Из-за гетерогенности субстрата данные по профилю в анализ не включались.

Четвертый профиль расположен в центре перемычки – «томболо» и представляет собой дно обширной депрессии с выраженным микрорельефом – злаково-осоковые кочки (диаметр – 1–1,5 м), перемежающиеся «полями» *Salicornia europaea*. Основной субстрат – средний суглинок, дренаж – 3 балла. ОПП – 60 % (gr). Доминанты (20–25 %) – *Plantago maritima*, *Agrostis straminea*, *Triglochin maritima*, *Salicornia europaea*, содоминанты (5–7 %) – *Juncus gerardii*, *Tripolium vulgare*, *Agrostis stolonifera*.

Пятый профиль – на северо-восточной оконечности о. Лопский, в отлив участок превращается в подобие лагуны, отделенной от моря скальными выходами шириной 10 м. Основной субстрат до скалы – средний суглинок, дренаж – 3 балла. ОПП растительности – 80 %, доминанты (40–60 %) – *Carex subspathacea*, *Agrostis stolonifera*, содоминанты (10–15 %) – *Tripolium vulgare*, *Plantago maritima*.

Шестой профиль расположен на перемычке – «томболо», ближе к проведенной насыпной дороге. Основной субстрат – средний суглинок с поверхностными трещинами и с выпотами солей, дренаж – от 2 до 4 баллов. ОПП растительности – 40 %, доминанты (25–30 %) – *Carex subspathacea*, *Juncus gerardii*, содоминанты (5–7 %) – *Triglochin maritima*, *Spergularia marina*.

Седьмой профиль расположен ближе к дороге и коренному берегу. Микрорельеф не выражен. Основной субстрат – средний суглинок с неудовлетворительным дренажем (1 балл). ОПП

растительности – 80 %, доминанты (30–40 %) – *Eleocharis uniglumis*, *Juncus gerardii*, *Bolboschoenus maritimus*, содоминанты (5–7 %) – *Carex glareosa*, *Triglochin maritimum*.

Восьмой профиль расположен на правом заболоченном берегу в устье р. Колежмы. Площадь террасы изрезана неглубокими протоками (глубина – 50–70 см), основной субстрат – средний суглинок, дренаж – 1 балл. ОПП растительности – 80 %, доминанты (10–15 %) – *Eleocharis uniglumis*, *Blasmus rufus*, *Bolboschoenus maritimus*, содоминанты (2–5 %) – *Triglochin maritima*, *Glaux maritima*.

РЕЗУЛЬТАТЫ

При сравнении видового состава приморских растительных сообществ различных уровней литорали с использованием кластерного анализа [2], [4], [10] выделились 2 кластера (группы) сообществ, отличающихся по видовому составу. Первый кластер включает сообщества на профилях с номерами 1, 2, 4, 6, второй – 5, 7 и 8, при этом чем меньше рассчитанное расстояние между объектами (профилями), тем более сходный видовой состав они имеют. В первом кластере видовой состав сообществ наиболее сходный, во втором – гетерогенный, значимо отличающийся от первого кластера. Субстрат на профилях 5, 7, 8 представлен средними суглинками с неудовлетворительным дренажем, на профилях 1, 2, 4, 6 – средними и легкими суглинками со слабым и довольно слабым дренажем.

Для анализа зависимости проективного покрытия и обилия приморских видов от субстрата и дренажа были отобраны 7 видов с разной экологической амплитудой, но встреченные на всех профилях: эвгалофиты – *Triglochin maritima*, *Plantago maritima*, *Tripolium vulgare*, *Carex subspathacea*, миогалофиты или виды местной флоры, толерантные к слабому засолению, – *Atriplex nudicaulis*, *Agrostis gigantea*, *Festuca rubra*. Для всех изученных миогалофитов и для двух эвгалофитов (*C. subspathacea*, *T. maritima*) зависимость их проективного покрытия от дренажа и от субстрата значима при доверительном интервале 0,05 и достоверности 95 %. Однако для *A. gigantea* и *T. maritima* на их проективное покрытие в сообществе имеет значимое влияние и удаленность местообитания от линии уреза воды (табл. 1).

При исследовании зависимости обилия вида от дренажа местообитания установлена зависимость с достоверностью 95 % при доверительном интервале (Р-значение) 0,05 для 4 из 7 видов: *A. gigantea*, *A. nudicaulis*, *C. subspathacea*, *F. rubra*. Однако для миогалофита *A. gigantea* значимое влияние на обилие вида имеет также удаленность местообитания от линии уреза воды (при достоверности 95 % и доверительном интервале 0,05) (табл. 2).

Таблица 1

Результаты статистического анализа зависимости проективного покрытия видов приморских высших растений от дренажа местообитания и его удаленности от линии уреза воды

<i>Carex subspathacea</i>						
Источник вариации	SS	df	MS	F	P-значение	F критическое
Дренаж	3850,667	1	3850,667	5,978522	0,026431	4,493998
Удаление от моря	1659	3	553	0,858585	0,482542	3,238872
Взаимодействие	2662,333	3	887,4444	1,377841	0,285453	3,238872
<i>Atriplex nudicaulis</i>						
Источник вариации	SS	df	MS	F	P-значение	F критическое
Дренаж	1116,281	1	1116,281	14,64976	0,000814	4,259677
Удаление от моря	537,3438	3	179,1146	2,350649	0,097617	3,008787
Взаимодействие	631,8438	3	210,6146	2,764046	0,063923	3,008787
<i>Festuca rubra</i>						
Источник вариации	SS	df	MS	F	P-значение	F критическое
Дренаж	1685,083	2	842,5417	4,07025	0,044737	3,885294
Удаление от моря	1027,167	3	342,3889	1,654053	0,229374	3,490295
Взаимодействие	1273,583	6	212,2639	1,025429	0,454507	2,99612
<i>Agrostis gigantea</i>						
Источник вариации	SS	df	MS	F	P-значение	F критическое
Дренаж	2420,042	1	2420,042	19,60871	0,000422	4,493998
Удаление от моря	2169,792	3	723,2639	5,860342	0,006727	3,238872
Взаимодействие	1824,125	3	608,0417	4,926739	0,013039	3,238872
<i>Triglochin maritima</i>						
Источник вариации	SS	df	MS	F	P-значение	F критическое
Дренаж	572,5417	2	286,2708	4,528507	0,017608	3,259446
Удаление от моря	564,7292	3	188,2431	2,97781	0,04424	2,866266
Взаимодействие	2017,958	6	336,3264	5,320334	0,000515	2,363751

Примечание. SS – сумма квадратов (отклонений), df – число степеней свободы, MS – математическое ожидание суммы квадратов, усредненная величина соответствующих SS, F – критерий Фишера эмпирический, P-значение – доверительный интервал, F критическое – критерий Фишера табличный.

Таблица 2

Результаты статистического анализа зависимости обилия видов приморских высших растений от дренажа местообитания и его удаленности от линии уреза воды

<i>Carex subspathacea</i>						
Источник вариации	SS	df	MS	F	P-значение	F критическое
Дренаж	8,166667	1	8,166667	5,090909	0,038398	4,493998
Удаленность от моря	1,75	3	0,583333	0,363636	0,780142	3,238872
Взаимодействие	3,75	3	1,25	0,779221	0,522637	3,238872
<i>Atriplex nudicaulis</i>						
Источник вариации	SS	df	MS	F	P-значение	F критическое
Дренаж	13,78125	1	13,78125	21,68852	9,93E-05	4,259677
Удаленность от моря	2,9375	3	0,979167	1,540984	0,229588	3,008787
Взаимодействие	3,90625	3	1,302083	2,04918	0,133751	3,008787
<i>Festuca pratensis</i>						
Источник вариации	SS	df	MS	F	P-значение	F критическое
Дренаж	10,9375	2	5,46875	6,402439	0,012819	3,885294
Удаленность от моря	4,125	3	1,375	1,609756	0,238937	3,490295
Взаимодействие	3,8125	6	0,635417	0,743902	0,625351	2,99612
<i>Agrostis gigantea</i>						
Источник вариации	SS	df	MS	F	P-значение	F критическое
Дренаж	6,510417	1	6,510417	8,802817	0,009084	4,493998
Удаленность от моря	9,614583	3	3,204861	4,333333	0,020433	3,238872
Взаимодействие	6,197917	3	2,065972	2,793427	0,073937	3,238872

Примечание. Условные обозначения такие же, как в табл. 1.

Таблица 3

Результаты статистического анализа значимости усиления влияния дренажа местообитания на проективное покрытие видов приморских высших растений в зависимости от удаленности местообитания от линии уреза воды

<i>Plantago maritima</i>						
Источник вариации	SS	df	MS	F	P-значение	F критическое
Дренаж	1081,125	1	1081,125	2,147131	0,1558156	4,259677214
Удаленность от моря	1105,125	3	368,375	0,731598	0,5432914	3,008786572
Взаимодействие	4725,125	3	1575,042	3,128057	0,0444198	3,008786572
<i>Agrostis gigantea</i>						
Источник вариации	SS	df	MS	F	P-значение	F критическое
Дренаж	2420,042	1	2420,042	19,60871	0,0004218	4,493998418
Удаленность от моря	2169,792	3	723,2639	5,860342	0,0067267	3,238871522
Взаимодействие	1824,125	3	608,0417	4,926739	0,0130385	3,238871522
<i>Triglochin maritima</i>						
Источник вариации	SS	df	MS	F	P-значение	F критическое
Дренаж	572,5417	2	286,2708	4,528507	0,0176085	3,259446306
Удаленность от моря	564,7292	3	188,2431	2,97781	0,0442397	2,866265557
Взаимодействие	2017,958	6	336,3264	5,320334	0,0005146	2,363750958

Примечание. Условные обозначения такие же, как в табл. 1.

Таблица 4

Результаты статистического анализа значимости усиления влияния дренажа местообитания на обилие видов приморских высших растений в зависимости от удаленности местообитания от уреза воды

<i>Plantago maritima</i>						
Источник вариации	SS	df	MS	F	P-значение	F критическое
Дренаж	3,445313	1	3,445313	2,705521	0,11303764	4,259677214
Удаленность от моря	0,210938	3	0,070313	0,055215	0,98251369	3,008786572
Взаимодействие	24,27344	3	8,091146	6,353783	0,00252057	3,008786572
<i>Trifolium vulgare</i>						
Источник вариации	SS	df	MS	F	P-значение	F критическое
Дренаж	6,510417	1	6,510417	8,802817	0,00908416	4,493998418
Удаленность от моря	9,614583	3	3,204861	4,333333	0,02043329	3,238871522
Взаимодействие	6,197917	3	2,065972	2,793427	0,07393657	3,238871522
<i>Triglochin maritima</i>						
Источник вариации	SS	df	MS	F	P-значение	F критическое
Дренаж	1,385417	2	0,692708	1,111421	0,34011957	3,259446306
Удаленность от моря	0,890625	3	0,296875	0,476323	0,70073291	2,866265557
Взаимодействие	10,53125	6	1,755208	2,816156	0,02373968	2,363750958

Примечание. Условные обозначения такие же, как в табл. 1.

Кроме того, для эвгалофитов *P. maritima*, *T. maritima* и миогалофита *A. gigantea* удаленность местообитания от уреза воды значимо усиливает влияние дренажа и субстрата на проективное покрытие видов с достоверностью 95 % при доверительном интервале 0,05 (табл. 3), а для эвгалофитов *P. maritima*, *T. vulgare*, *T. maritima* удаленность местообитания от линии уреза воды также значимо усиливает влияние дренажа и субстрата на обилие видов с достоверностью 95 % при доверительном интервале 0,05 (табл. 4).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Установлено, что видовой состав приморских сообществ на побережье Белого моря, обитающих на субстрате с неудовлетворительным дренажем (зарастающие депрессии на перемычках от острова к коренному берегу, илистые осушки в устье реки), статистически значимо отличается от видового состава приморских сообществ, обитающих на субстратах со слабым дренажем (илисто-гравийные и илисто-песчаные берега острова с мористой стороны, задер-

нованные луговины со злаково-разнотравными сообществами).

2. Дренаж местообитания значимо влияет на проективное покрытие видов эвгалофитов как с широкой экологической амплитудой, доминирующих на первичных илистых осушках, – *Triglochin maritima*, *Carex subspathacea*, так и содоминирующих в сомкнутых злаково-разнотравных сообществах, – *Atriplex nudicaulis*. Также значимо влияние дренажа на миогалофитов, выносящих слабое засоление субстрата и содоминирующих в полидоминантных злаково-осоковых сообществах с разнотравьем, – *Festuca rubra*, *Agrostis gigantea*. Для 2 видов – эвгалофит *Triglochin maritima* и миогалофит *Agrostis gigantea* – установлено влияние удаленности местообитания от линии уреза воды на проективное покрытие видов.

3. Дренаж местообитания значимо влияет на обилие видов, не являющихся эдификаторами ценозов при зарастании первичных илистых осушек и такырообразных депрессий в пониже-

ниях, – *Atriplex nudicaulis*, *Carex subspathacea*, *Festuca rubra*, *Agrostis gigantea*. Все эти виды – только содоминанты в более сомкнутых злаково-осоковых сообществах, за исключением однолетника *Atriplex nudicaulis*, предпочитающего как штормовые выбросы на осушках, так и слабо сомкнутые злаково-подорожниково-триостренниковые сообщества. Для миогалофита *A. gigantea*, с небольшим обилием встречающегося в злаково-разнотравных сообществах на более задернованных субстратах, достоверно влияние удаленности местообитания от линии уреза воды на его обилие.

4. Удаленность местообитания от моря значимо и достоверно усиливает влияние дренажа на всех типах местообитаний как на проективное покрытие, так и на обилие видов-эвгалофитов *Plantago maritima*, *Triglochin maritima*, но для эвгалофита *Tripolium vulgare* влияние дренажа значимо усиливает только обилие вида, а для миогалофита *Agrostis gigantea* – только проективное покрытие вида.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бабина (Заславская) Н. В. Приморская флора западного побережья Белого моря // Ботанический журнал. 2003. Т. 88. № 2. С. 60–74.
2. Ивантер Э. В., Коросов А. В. Введение в количественную биологию. Петрозаводск: Изд-во ПетрГУ, 2003. 304 с.
3. Камелин Р. В. Лекции по систематике растений. Главы теоретической систематики растений. Барнаул, 2004. 228 с.
4. Коросов А. В., Горбач В. В. Компьютерная обработка биологических данных. Петрозаводск: Изд-во ПетрГУ, 2007. 76 с.
5. Почвоведение. Ч. 2. Типы почв, их география и использование / Под ред. В. А. Ковды, Б. Г. Розанова. М.: Высш. шк., 1988. 368 с.
6. Сергиенко Л. А. Очерк флоры приморской полосы Белого моря // Ботанический журнал. 1983. Т. 68. № 11. С. 1512–1521.
7. Сергиенко Л. А. Флора и растительность побережий Арктики и сопредельных территорий. Петрозаводск: Изд-во ПетрГУ, 2008. 225 с.
8. Юрцев Б. А. Флора как природная система // Бюллетень МОИП. Отд. биол. 1982. Т. 87. Вып. 4. С. 3–22.
9. Юрцев Б. А. Некоторые перспективы развития сравнительной флористики на рубеже XXI века // Проблемы ботаники на рубеже XX–XXI веков: Тез. докл. II (X) съезда РБО. СПб., 1998. Т. 2. С. 184–185.
10. Юрцев Б. А., Семкин Б. И. Изучение конкретных и парциальных флор с помощью математических методов // Ботанический журнал. 1980. Т. 65. № 12. С. 1706–1718.
11. Chapman V. I. Salt marshes and salt deserts of the world. N. Y., 1960. 392 p.

УДК 597.552.511(470.22)

ИГОРЬ АЛЕКСАНДРОВИЧ ТЫРКИН

аспирант кафедры зоологии и экологии эколого-биологического факультета, Петрозаводский государственный университет
igor7895@yandex.ru

ИГОРЬ ЛЬВОВИЧ ЩУРОВ

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

ВЯЧЕСЛАВ АНАТОЛЬЕВИЧ ШИРОКОВ

заместитель директора по научной работе Северного научно-исследовательского института рыбного хозяйства, Петрозаводский государственный университет
shurov@research.karelia.ru

ДМИТРИЙ ЭРНЕСТОВИЧ ИВАНТЕР

кандидат биологических наук, директор Северного научно-исследовательского института рыбного хозяйства, Петрозаводский государственный университет
ivanter@research.karelia.ru

ЮРИЙ АЛЕКСАНДРОВИЧ ШУСТОВ

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

ЛОСОСИНКА: ПЕРСПЕКТИВЫ ВОЗРОЖДЕНИЯ СТАТУСА ЛОСОСЕВОЙ РЕКИ

В статье подсчитана площадь нерестово-выростных угодий и интенсивность питания молоди лосося. Приведены данные о плотностях расселения молоди лосося на порогах реки после заводских выпусков. Высказаны предложения по рекультивации грунта на нерестово-выростных угодьях.

Ключевые слова: пресноводный лосось, плотности распределения рыб, интенсивность питания рыб, площадь нерестово-выростных угодий, искусственные препятствия миграции рыб

ВВЕДЕНИЕ

В настоящий период экологии водотоков и водоемов уделяется больше внимания, чем ранее, особенно если водоемы находятся в урбанизированной зоне и являются объектами рекреации [5], [17], [18].

В литературе имеется информация об успешном восстановлении популяций не только дикого лосося, но и других популяций ценных промысловых рыб. В качестве примера приведем р. Рейн [20], [19], в притоках которой ихтиологам удалось добиться естественного нереста вселенной популяции лосося. Есть примеры успешного восстановления популяций и в реках, схожих с Лососинкой. В Финляндии построено много рыбоходов, в том числе и на р. Вантаанйоки, которая протекает по г. Хельсинки [21].

Река Лососинка (рис. 1) ранее являлась лососевой рекой. Когда река была в естественном состоянии, на нерест из Онежского озера поднимались атлантический лосось и озерная форель. В связи со строительством в 1703 году в устье Лососинки Петровского оружейного завода было возведено несколько плотин. Строительство плотин вызвало нарушение естественных путей миграции лосося и озерной форели, что привело к подрыву, а в дальнейшем и к полному

исчезновению этих видов рыб в реке. К настоящему времени в русле Лососинки сохранились неиспользуемые для энергогенерации и нужд г. Петрозаводска плотины. Первая находится в 480 м от устья, перед ней имеется быстроток (рис. 2) (плотина городской ГЭС). Вторая плотина расположена в 2450 м от устья (рис. 3), а третья – на расстоянии 3080 м от устья (рис. 4). Если обеспечить производителям доступ к нерестово-выростным угодьям (НВУ) реки, то она может вновь быть причислена к списку лососевых рек Онежского озера.



Рис. 1. Река Лососинка выше городской черты, 6100 м выше устья. Фото И. А. Тыркина



Рис. 2. Плотина и быстроток в 480 м выше устья. Фото И. А. Тыркина

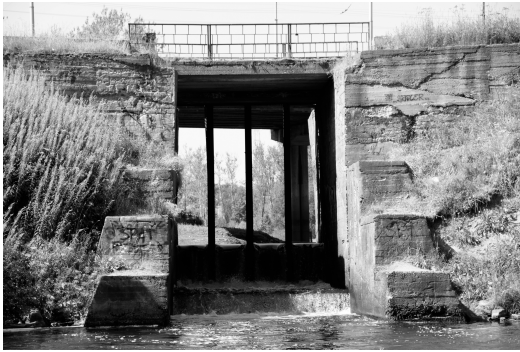


Рис. 3. Плотина в 2450 м от устья. Фото И. А. Тыркина



Рис. 4. Плотина в 3080 м от устья. Фото И. А. Тыркина

В физико-географическом отношении бассейн р. Лососинки расположен на западном побережье Онежского озера в подзоне средней тайги. Лососинка относится к группе малых рек Республики Карелия. Исток реки ($61^{\circ}40,84'$ с. ш. и $34^{\circ}12,54'$ в. д.) происходит в оз. Лососинском, расположенном в 17 км от г. Петрозаводска, имеет протяженность 25 км и впадает ($61^{\circ}47,15'$ с. ш. и $34^{\circ}23,98'$ в. д.) в Петрозаводскую губу Онежского озера [7] (рис. 5). Падение реки составляет 150 м, средний уклон – 6,03 %. Прозрачность воды не более 30 см. Площадь водосбора – 322 км², заболоченность – 10 %, озерность – 5,7 %, средний многолетний расход воды – 3,66 м³/с [10]. Река относительно бедна биогенными элементами, особенно минеральными формами азота и фосфора. Вода недо насыщена кислородом (дефицит 15–25 %), pH изменяется от слабокислого в верховье до слабощелочного в устье [12].

Целью исследования является оценка величины и состояния НВУ и лосося, изучение расселения молоди в реке, ее численности и питания, сравнение интенсивности питания молоди лосося с аборигенными видами рыб.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Во время летней межени в 2007 году нами было выполнено обследование р. Лососинки от истока до устья путем сплава на лодке и пешими

маршрутами. На всем протяжении реки собрана информация о характере речного дна и фракционном составе донных грунтов. Все полевые данные занесены в подробную схему реки (рис. 5). Была произведена оценка нерестово-выростного фонда и условий воспроизводства лосося. Оценка учитывала пригодность участков для нереста и инкубации икры, условий обитания 3 размерно-возрастных групп молоди лосося: длиной до 10 см, 10–15 см и более 15 см. Также при оценке учитывалось изменение уровня воды в реке в течение всего года. Площадь русла реки подсчитывалась планиметром по построенной нами схеме реки (рис. 5). Плотность заселения реки молодь оценивали по результатам облова при помощи аккумуляторного электролова. Расчеты проводили по методу Зиппина [23].

Мальков отлавливали электроловом по общепринятой методике [8], [22] и двумя сачками с диаметром (d) входного отверстия 0,5 м, длина кута – 0,5 м, ячея – 4 мм. После подсчета пойманную молодь выпускали в местах облова. Часть пойманных рыб была зафиксирована 4 % раствором формалина для подсчета индекса наполнения желудка. Дальнейшая обработка велась в камеральных условиях. Исследования питания рыб проводились в соответствии с общепринятыми требованиями [9]. Пищу для анализа брали из желудка; у рыб, не имеющих желудка, пищу брали из пищеварительного тракта. При

Кроме молоди лосося на обследованных нами участках были обнаружены бычок-подкаменщик (*Cottus gobio* L.), голец усатый (*Noemacheilus barbatulus* L.), хариус (*Thymallus thymallus* L.), форель (*Salmo trutta morpha fario*). На НВУ, расположенном в 4,6 км от устья, плотность распределения бычка-подкаменщика составила 74 экз./100 м², гольца усатого – 48 экз./100 м². В городской черте на месте облова (1,7 км от устья) плотности распределения гольца усатого – 80 экз./100 м², бычка-подкаменщика – 42 экз./100 м². На участке реки, расположенном в 100 м от устья, плотности распределения гольца усатого – 110 экз./100 м², бычков – 30 экз./100 м², лосось не обнаружен. Форель и хариус на обследуемых порогах встречались единично и выше городской черты.

Для определения интенсивности питания и использования кормовых ресурсов реки 16 марта 2007 года на пороге (на расстоянии около 6200 м от устья реки) было отловлено 16 особей заводской молоди лосося длиной АВ 9,7 (8,0–13,2), весом 8,2 (4,5–19) г. В процессе облова попадались бычок-подкаменщик и голец усатый (10 и 6 экз.), которые также были исследованы. Все особи, в том числе лосось, интенсивно питались донными беспозвоночными: личинками хирономид и ручейников, нимфами поденок и веснянок. Индекс наполнения желудка молоди лосося составил 97 ‰, бычков-подкаменщиков – 145 ‰, голец усатых – 35 ‰. Индекс наполнения желудка молоди лосося достаточно высок, следовательно, молодь активно питалась.

Спектр питания молоди лососевых рыб изучен достаточно подробно [13], [15]. При анализе питания двухлеток молоди лосося (табл. 2) отмечены группы беспозвоночных, являющихся основой питания. Это личинки ручейников, поденок, веснянок, хирономид и симулид. Единично в питании встречаются гидрокарины, олигохеты, личинки двукрылых семейства *Limoniidae*, а также имаго насекомых, личинки которых развиваются в почве. В пробах питания по биомассе доминируют ручейники, а по численности – личинки хирономид (табл. 3).

Таблица 2

Размерно-весовые характеристики и индекс наполнения желудка молоди лосося (наши данные)

Номер п/п	Длина, см			Возраст, лет	Вес, г	Вес пищевого комка, мг	Индекс наполнения желудка, ‰
	AB	AC	AD				
1	10,7	10,3	9,7	1+	16,0	164,0	102,5
2	10,6	10,0	9,5	1+	14,0	137,0	102,2
3	10,0	9,4	8,6	1+	11,0	49,0	44,5
4	10,0	9,5	8,7	1+	11,0	87,0	79,1
5	9,6	9,1	8,5	1+	9,0	80,0	88,9
6	9,5	9,1	8,5	1+	10,0	97,0	97,0
7	9,1	8,5	8,0	1+	8,0	68,0	85,0
8	8,8	8,3	7,7	1+	7,0	64,0	91,4

Таблица 3

Значение ведущих групп гидробионтов в питании молоди лосося р. Лососинки (наши данные)

Состав пищевого комка	Абсолютные показатели		Относительные показатели	
	численность, экз.	биомасса, мг	в % от общей численности	в % от общей биомассы
<i>Ephemeroptera</i> L.	27	53,6	29	39
<i>Trichoptera</i> L.	12	67,2	12,9	48,9
<i>Chironomidae</i> L.	43	9,0	46,2	6,6
<i>Simuliidae</i> L.	11	7,6	11,8	5,5

При довольно высоком индексе наполнения желудков – до 102,2 ‰ – в питании молоди лосося по биомассе преобладают личинки ручейников, составляющие 48,9 % от общей биомассы пищевого комка. Это *Arctopsche ladogensis*, *Hydropsyche pellucidula*, а также личинки *Brachycentricus subnubilus* и *Atripsodes cinerens*. Из поденок в питании доминируют нимфы и личинки поденок рода *Baetis* – до 39 % по биомассе. Доступность гидробионтов как корма для рыб зависит от наличия обрастаний, заиления грунта и местообитания самих организмов, в особенности ручейников семейства *Hydropsychidae*. Эти ручейники, строящие свои ловчие сети между камнями, являются одним из самых доступных кормовых объектов для молоди лосося, чем и объясняется их доминирование в составе пищевого комка.

Материалы по кормовой базе р. Лососинки опубликованы в ряде работ [12], [1], [2], [3], [4]. В реке представлены водные беспозвоночные 20 (согласно другим данным, 16) систематических групп [12], [4]. Эти систематические группы встречаются и в других притоках Онежского озера [14]. Кормовые ресурсы для молоди лосося на порогах, расположенных выше городской черты, можно считать хорошими. В приустьевых участках кормовая база находится в плохом состоянии. В целом кормовые ресурсы отвечают требованиям лососевой реки.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Наши исследования показали, что р. Лососинка сохранила потенциал для восстановления статуса соответствия своему названию. Проведенный анализ нерестово-выростных участков реки, результатов по расселению молоди по порогам и интенсивности ее питания позволяет сделать вывод о возможности восстановления полноценной популяции лосося в реке.

В дальнейшем необходимо продолжать выпуск молоди лосося в реку для создания его устойчивой популяции. Для эффективного заселения и создания оптимальной плотности заселения молоди на НВУ, а также повышения выживаемости молоди и эффективного использо-

вания кормовых ресурсов реки необходимо выпускать разновозрастную молодь (от сеголеток и старше). Это позволит повысить жизнеспособность создаваемой популяции за счет увеличения числа возрастных групп. Также положительно сказывается на выживаемости молоди выпуск на разных порогах реки.

Кормовые ресурсы реки находятся в хорошем состоянии и не являются лимитирующим фактором для восстановления популяции лосося. Выпущенная молодь успешно питается, о чем свидетельствует индекс наполнения желудка.

В городской черте русло р. Лососинки достаточно сильно загрязнено антропогенным мусором (упаковочная тара, пластик, стекло, металлолом и т. п.). Молодь лосося на этих участках, вероятнее всего, будет обитать, но плотности ее будут минимальными. Это связано с кормовой

базой, которая в этих местах очень низка. Для миграции производителей антропогенный мусор не является существенным препятствием по сравнению с тремя плотинами, расположенными в 480, 2450, 3080 м от устья реки. Производители не смогут преодолеть их самостоятельно, для этого необходимо демонтировать плотины или построить рыбоходы.

Для улучшения условий нереста и обитания молоди лосося в реке необходимо: очистить русло реки в городской черте от антропогенного мусора, произвести рыхление грунтов на порогах и перекатах, а также подсыпку речного гравия (фракциями не более 10 см в диаметре) на определенных участках русла реки, создать углубленные участки в русле для возможности отставивания взрослых особей при анадромной миграции.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Барышев И. А. Характеристика бентофауны порожистого участка реки Лососинка и оценка его кормовых ресурсов // Тез. докл. междунар. конф. «Крупнейшие озера в Европе Ладожское и Онежское». Петрозаводск, 1996. С. 136–138.
2. Барышев И. А. Бентофауна р. Лососинка как пример формирования кормовой базы реки на урбанизированной территории // Тез. докл. II (XXV) междунар. конф. «Биологические ресурсы Белого моря и внутренних водоемов Европейского Севера». Петрозаводск, 1999. С. 314–316.
3. Барышев И. А. Особенности распределения донных беспозвоночных на пороговых участках реки Лососинка (бассейн Онежского озера) // Актуальные проблемы биологии и экологии: Тез. докл. VI молодежной науч. конф. Сыктывкар, 1999. С. 15–16.
4. Барышев И. А. Влияние городских стоков на бентосных беспозвоночных пороговых участков р. Лососинка (Карелия) // Биология внутренних вод. Борок, 2001. С. 73–78.
5. Богатов В. В. Экология речных сообществ российского Дальнего Востока. Владивосток: Дальнаука, 1994. 218 с.
6. Гуляева А. М., Заболоцкий А. А. Оз. Лососинное (водохранилище) // Озера Карелии: Справочник. Петрозаводск, 1959. С. 353–359.
7. Каталог озер и рек Карелии. Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2001. 290 с.
8. Маслов С. Е. Применение электроловов ранцевого типа в ихтиологических исследованиях на лососевых реках // Тез. докл. респ. конф. Петрозаводск, 1989. С. 22–28.
9. Методическое пособие по изучению питания и пищевых отношений рыб в естественных условиях. М., 1974. 254 с.
10. Ресурсы поверхностных вод СССР. Т. 2: Карелия и Северо-Запад. Л.: Гидрометиздат, 1972. 959 с.
11. Тыркин И. А., Щуров И. Л., Широков В. А. Состояние естественного воспроизводства пресноводного лосося в некоторых притоках Онежского озера // Материалы XXVIII междунар. конф. «Биологический ресурсы Белого моря и внутренних водоемов Европейского Севера». Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2009. С. 573–578.
12. Хренников В. В., Барышев И. А., Щуров И. Л. Возможности кормовых ресурсов реки Лососинки и условия обитания в ней молоди лосося *Salmo salar morpha sebago* (Girard) // Проблемы лососевых на Европейском Севере. Петрозаводск: КарНЦ РАН, 1998. С. 147–157.
13. Шустов Ю. А. Экология молоди атлантического лосося. Петрозаводск: Карелия, 1983. 152 с.
14. Шустов Ю. А., Смирнов Ю. А. Питание, рост и расселение молоди лосося в реках // Лососевые нерестовые реки Онежского озера. Биологический режим. Использование. Л.: Наука, 1978. 102 с.
15. Шустов Ю. А., Хренников В. В. К характеристике питания и взаимоотношений молоди лосося *Salmo salar morpha sebago* (Girard) с кормовой базой рек // Лососевые (Salmonidae) Карелии. Петрозаводск, 1976. С. 150–158.
16. Щуров И. Л., Широков В. А., Гайда Р. В. Атлантический (пресноводный) лосось // Биоресурсы Онежского озера. Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2008. С. 98–115.
17. Экологическое состояние малых рек Верхнего Поволжья. М.: Наука, 2003. 389 с.
18. Экосистемы малых рек: биоразнообразие, экология, охрана: Сб. тез. докл. Всерос. конф., 16–19 ноября 2004 г. Борок, 2004. 115 с.
19. Becker A., Rey P. Rückkehr der Lachse in Wiese, Birs und Ergolz. Statusbericht. Vollzug Umwelt. Mitteilungen zur Fischerei. Nr. 79. Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft. Bern, 2005. 47 s.
20. Froehlich-Schmitt B. Rhein Lachs 2020. Programm für Wanderfische im Rheinsystem. Koblenz, 2004. 32 s.
21. Kalateiden suunnittelu- ja mitoitusohjeet. Environment Guide 62. Finnish Environment Institute. Helsinki, 1999. 164 p.
22. Karlstrom O. Quantitative Methods in Electrical Fishings in Swedish Salmon Rivers // ZOOH. 1976. Vol. 4. P. 53–63.
23. Zippin C. An evaluation of removal method of estimating animal populations // Biometrics. 1956. Vol. 12. P. 163–169.

МАРИЯ ВИКТОРОВНА ЧУРОВА

младший научный сотрудник Института биологии, Карельский научный центр РАН
mchurova@yandex.ru

ОЛЬГА ВЛАДИМИРОВНА МЕЩЕРЯКОВА

кандидат биологических наук, старший научный сотрудник Института биологии, Карельский научный центр РАН
mesch@krc.karelia.ru

НИНА НИКОЛАЕВНА НЕМОВА

доктор биологических наук, профессор, член-корреспондент РАН, директор Института биологии, Карельский научный центр РАН
nemova@krc.karelia.ru

ВЗАИМОСВЯЗЬ АКТИВНОСТИ ФЕРМЕНТОВ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО ОБМЕНА С ТЕМПАМИ РОСТА И РАЗМЕРАМИ РЫБ

В статье рассматривается вопрос о значении уровня аэробного и анаэробного энергетического обмена для роста и развития рыб в раннем онтогенезе. Обобщены данные по взаимосвязи активности ферментов энергетического обмена цитохромоксидазы, цитратсинтазы, малатдегидрогеназы, лактатдегидрогеназы, пируваткиназы в мышцах с темпами роста и размерами рыб. Приведены сведения о регуляции активности ферментов на уровне транскрипции у разных по размерам рыб.

Ключевые слова: аэробный и анаэробный обмен, ферменты, рыбы, темпы роста, размеры, экспрессия генов

ЗНАЧЕНИЕ УРОВНЯ АЭРОБНОГО И АНАЭРОБНОГО ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО ОБМЕНА ДЛЯ РОСТА И РАЗВИТИЯ РЫБ В РАННЕМ ОНТОГЕНЕЗЕ

Важнейшим фактором, определяющим нормальное функционирование организма и его способность адаптироваться к постоянно изменяющимся условиям окружающей среды, является уровень энергетического обмена. В процессе роста организма энергия в виде АТФ прежде всего необходима для синтеза структурных соединений, функциональных молекул и запасных веществ [1], [33]. Основополагающими процессами образования энергии АТФ у высших животных являются два метаболических пути: аэробный путь синтеза АТФ и анаэробный – гликолиз, идущий до образования молочной кислоты [10]. Оба эти процесса имеют важное значение для энергообеспечения клеток различных органов и тканей организма, однако интенсивность каждого из них определяется метаболическими условиями, скоростью потребления АТФ и функцией клеток того или иного органа.

Аэробный синтез АТФ (тканевое дыхание) в энергетическом плане гораздо экономичнее и эффективнее анаэробного. Аэробный метаболизм свойственен клеткам большинства тканей и органов высших животных, он и обуславливает активный рост и развитие организма рыб, особенно в период раннего онтогенеза [7], [8], когда требуются большие энергетические затраты на синтез структурных и функциональных соединений. Аэробный обмен имеет особое значение для роста мышечной массы рыб, увеличение

ние объема которой определяет общие темпы роста особи. Рост мышц обусловлен главным образом приростом белых анаэробных волокон. Белые скелетные мышцы составляют примерно половину массы тела рыб, на их долю приходится 40 % от общего количества синтезируемого организмом белка [27]. Активный рост мышечной массы характеризуется интенсивным процессом синтеза белков в мышечных волокнах [27], [33]. Следует уточнить, что энергообеспечение сокращения белых мышц осуществляется преимущественно за счет АТФ, образованной анаэробным путем, а все биосинтетические процессы, требующие большого количества энергии, протекают за счет энергии АТФ, образуемой аэробным путем. Как было установлено для некоторых видов рыб [27], на синтез белка тратится количество АТФ, эквивалентное 40 % от всего кислорода, потребляемого организмом. В целом на долю обменных процессов в мышцах приходится более половины АТФ, образованной аэробным путем [24]. Поэтому уровень аэробного метаболизма является одним из факторов, определяющих интенсивность белкового синтеза в мышечных тканях [25], [40].

Несмотря на высокий количественный выход АТФ и возможность окисления различных субстратов (промежуточных продуктов распада углеводов, жиров и белков), аэробный процесс характеризуется относительно низкой скоростью образования энергии (мощностью) и зависимостью от поступления кислорода. При определенных физиологических состояниях организма, сопровождающихся высокой скоростью потреб-

ления АТФ, например при интенсивной работе скелетных мышц, энергетические потребности сокращающихся мышц превышают возможности синтеза АТФ в аэробном метаболизме и компенсируются за счет анаэробного обмена.

Поскольку аэробный метаболизм играет ведущую роль в энергетическом обмене рыб, особенно на ранних стадиях онтогенеза, то воздействие различных неблагоприятных факторов среды, влияющих на дыхательную функцию рыб, или факторов, повреждающих структуру и функции митохондрий, ингибирующих активность ферментов аэробного метаболизма, имеет серьезные последствия для жизнедеятельности всего организма в целом. Снижение уровня аэробного синтеза АТФ в органах и тканях рыб проявляется замедлением темпов их роста, снижением физической активности, иммунной защиты и способности адаптироваться к новым условиям среды, что, в свою очередь, сказывается на их выживаемости [3], [5], [38].

Вторым процессом получения энергии служит анаэробный путь синтеза АТФ – гликолиз, идущий с образованием молочной кислоты (лактата). Этот процесс характеризуется высокой максимальной скоростью образования АТФ, однако с точки зрения количественного выхода АТФ он является неэффективным процессом образования энергии и ограничивается возможностью использования и запасаания углеводов. Фактором, лимитирующим интенсивность этого процесса, является также сдвиг рН клеток в кислую сторону, обусловленный накоплением избыточных количеств конечного продукта гликолиза – молочной кислоты.

Активизация анаэробного пути синтеза АТФ во многих клетках организма рыб происходит в условиях, сопровождающихся дефицитом АТФ, который может возникать в результате высокой скорости потребления АТФ и/или снижения уровня аэробного синтеза АТФ. Так, при интенсивных сокращениях в миоцитах белых скелетных мышц в сотни раз возрастает потребление АТФ, которое не может быть обеспечено только за счет синтеза АТФ аэробным путем в силу его низкой скорости и невозможности адекватного увеличения объемов дыхания. Недостающее количество АТФ при субмаксимальной нагрузке на мышцу образуется главным образом за счет анаэробного гликолиза, достигающего большой скорости. Как известно, молодь рыб характеризуется высоким уровнем физической активности [8], [9], что необходимо для удержания особи в потоке воды, поиска и добычи пищи, защиты от хищников. Поэтому в период раннего онтогенеза большой вклад в энергообеспечение организма рыб и, в частности, скелетных мышц вносит анаэробный гликолиз.

Интенсификация гликолиза в клетках различных органов и тканей рыб может носить ха-

рактер компенсаторной реакции, направленной на поддержание уровня энергетического обмена в условиях снижения интенсивности процесса окислительного фосфорилирования, вызванного различными факторами [3], [5], [6], [41]. Анаэробный синтез АТФ является одним из важнейших механизмов регуляции энергетического обмена клеток различных органов и тканей рыб, особенно в раннем онтогенезе, а также при адаптациях к изменению условий окружающей среды.

Исключительная значимость энергетического метаболизма для жизнедеятельности, роста и развития молоди рыб определяет необходимость исследования уровня аэробного и анаэробного обмена при изучении темпов роста молоди рыб, возрастных, половых, сезонных, экологических и эволюционных закономерностей этого процесса, механизмов формирования размерной разноразличности рыб в раннем онтогенезе, в том числе при влиянии различных факторов среды. Достоверную оценку параметров энергетического обмена, интенсивности и направления составляющих его путей можно проводить на основании определения активности ключевых ферментов аэробного и анаэробного метаболизма. Важнейшим показателем уровня аэробного обмена является цитохром с оксидаза (цитохром-оксидо-оксидаза, ЦО), ключевой фермент дыхательной цепи [23], [25]. Этот фермент катализирует конечный этап переноса электронов с цитохрома с на кислород в процессе окислительного фосфорилирования. ЦО отражает уровень синтеза АТФ из всех промежуточных субстратов распада – углеводов, липидов и белков. В оценке уровня аэробного обмена используются также активность ферментов цикла трикарбоновых кислот – малатдегидрогеназы (МДГ) и регуляторного фермента – цитратсинтазы (ЦС). В качестве индикатора уровня гликолиза используется активность пируваткиназы (ПК), катализирующей превращение фосфоенолпирувата в пируват, который дальше может окисляться в аэробном метаболизме или превращаться в гликолизе в молочную кислоту под действием лактатдегидрогеназы (ЛДГ) [42]. Лактатдегидрогеназа катализирует взаимопревращения лактата и пирувата. Направление реакции, катализируемой ЛДГ, определяется изоформами фермента. В мышцах преобладает изофермент ЛДГ-А₄, который катализирует реакцию восстановления пирувата в лактат и характеризует уровень анаэробного обмена.

АКТИВНОСТЬ ФЕРМЕНТОВ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО ОБМЕНА И ТЕМПЫ РОСТА РЫБ

Как было сказано выше, белые мышцы вносят наибольший вклад в синтез и запасаение белка растущей рыбы, составляют большую часть тела. Таким образом, прирост мышечной массы

отражает темпы роста всего организма рыб [27]. В литературе имеется много данных о взаимосвязи активности ферментов аэробного и анаэробного обмена в белых мышцах молоди различных видов рыб с темпами их роста. Например, показано, что активность ферментов цитохром с оксидазы и цитратсинтазы в мышцах коррелирует с темпами роста ювенильной атлантической трески *Gadus morhua* [18], [21], [40], молоди сайды *Pollachius virens* [32] и окуня *Perca flavescens* [23]. Таким образом, высокий уровень аэробного синтеза АТФ обеспечивает необходимым количеством энергии процессы синтеза структурных, функциональных и запасных соединений в мышцах и поэтому обуславливает необходимый темп роста и развития молоди рыб.

Согласно многочисленным литературным данным, активность ферментов гликолиза – лактатдегидрогеназы и пируваткиназы в белых мышцах коррелирует с темпами роста атлантической трески [18], [39], молоди сайды [32] и пятнистой зубатки *Anarhichas minor* [28], что свидетельствует о наличии положительной взаимосвязи между высоким уровнем энергетического обмена в скелетных мышцах и скоростью прироста мышечной ткани. Это объясняется тем, что при высокой физической активности особей, характеризующейся быстрыми сокращениями белых мышц, значительно усиливается синтез сократительных белков в мышце и увеличивается объем мышечной массы [15]. Например, на некоторых видах рыб показано, что существует положительная корреляция между активностью изофермента ЛДГ-А₄ и приростом мышечной массы [14], а также между общей активностью ЛДГ и скоростью плавания рыб [26]. Установлена также положительная корреляция активности ЛДГ в белых мышцах с уровнем экспрессии генов сократительных мышечных белков [28]. Подтверждением этому являются наши собственные данные, полученные на микиже *Parasalmo mykiss* [12] и сигах *Coregonus lavaretus* [11], согласно которым активность ЛДГ коррелирует с уровнем экспрессии гена миозина – главного сократительного белка белых мышечных волокон.

Некоторые сравнительные исследования по активности ферментов у быстрорастущих и медленно растущих рыб доказывают наличие взаимосвязи уровня энергетического обмена и темпов роста рыб. Так, Д. С. Павлов с коллегами [9] проводили исследование по сравнению активности ферментов энергетического обмена у двух групп лососей *Salmo salar* одной генерации, расселившихся после вылупления в различные биотопы реки, отличающиеся гидрологическими и кормовыми условиями. Сеголетки лосося, расселившиеся в притоке реки, имели лучшие кормовые условия, отличались высокой физической активностью, выживаемостью и большими раз-

мерами по сравнению с особями, оставшимися в русле реки. Их метаболизм характеризовался более высокой активностью ферментов ЦО, МДГ, ЛДГ. Высокая активность ферментов аэробного и анаэробного синтеза АТФ у сеголеток лосося, обитающих в притоке, обусловлена необходимостью окисления большого количества поступающих питательных веществ и образованием значительного количества АТФ, который расходуется на поддержание высокой физической активности и восстановительные реакции пластического обмена – образование структурных и запасных веществ для роста и развития молоди лосося. Аналогичные данные получены для озерной форели *Salvelinus namaycush* [34]. При сравнении особей этого вида рыб из двух озер, отличающихся по своей кормовой базе, было обнаружено, что у быстрорастущей молоди активность ферментов аэробного обмена ЦС и ЦО была значительно выше, чем у медленно растущих рыб.

В исследовании на заводской молоди лосося [36] показаны различия в активностях ЛДГ и ЦО у особей одного поколения, различавшихся по интенсивности питания. Та группа особей, которая начала питаться раньше и питалась больше, преуспевала в росте и была крупнее по размерам. Уровень активности ЦО и ЛДГ в мышцах особей из этой группы лососей был значительно выше, чем у более мелких рыб.

Многочисленные исследования, проведенные на различных видах рыб, показывают, что быстрорастущая молодь имеет высокий уровень энергетического обмена, определяющийся высокой активностью ферментов аэробного и анаэробного синтеза АТФ в белых скелетных мышцах.

ВЗАИМОСВЯЗЬ АКТИВНОСТИ ФЕРМЕНТОВ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО ОБМЕНА С РАЗМЕРАМИ РЫБ

Различные факторы – наследственность, условия среды обитания, особенности питания, сезонные ритмы и другие могут в значительной степени определять и задавать темпы роста особей одного поколения, что приводит к формированию вариаций линейно-весовых характеристик особей [2]. Этот процесс особенно выражен в период раннего онтогенеза рыб. С возрастом различия в размерах рыб одной популяции сглаживаются, становятся менее существенными. Исследования взаимосвязи активности ферментов с размерами рыб носят общее название «масштабирование ферментов» (enzyme scaling). Эта взаимосвязь наиболее выражена для ферментов аэробного и анаэробного обмена в мышцах рыб [35]. Так, установлена положительная корреляция активности малатдегидрогеназы скелетных мышц с массой тела рыб для ювенильных особей атлантической трески [30] и клариевого сома *Clarias batrachus* [44]. В работе Каупа [29] также

показана положительная взаимосвязь активности цитратсинтазы белых мышц с размерами тела личинок и ювенильных особей морских рыб 5 видов. Активность ферментов гликолиза ЛДГ и ПК в мышцах повышается с увеличением массы тела разных видов рыб, что показано для клариевого сома [44], некоторых видов морских окуней [19], [37], пятнистой зубатки [28], ювенильных особей атлантической трески [30] и других видов морских рыб [42], а также для заводской радужной форели [16], [43]. Как уже говорилось выше, подобная взаимозависимость активности ферментов гликолиза в белых мышцах с массой тела связана с локомоторной функцией мышц, усиление которой сопровождается активным синтезом сократительных белков и приростом мышечной массы.

В некоторых упомянутых выше исследованиях [16], [19], [37], [42], [43] не установлена положительная взаимосвязь активности аэробного фермента ЦС мышц с массой тела рыб. В связи с этим авторами выдвинуто предположение, что снижение активности аэробных ферментов у более крупных особей того или иного вида связано с более низким уровнем потребления кислорода мышцами. Возможно, степень кровоснабжения мышц определяется отношением поверхности тела и размеров органов дыхания и сердечно-сосудистой системы к объему мышечной массы тела. Однако эти предположения остаются спорными [10]. Следует обратить внимание также на то обстоятельство, что в упомянутых работах изучали большой размерный ряд рыб без учета их возраста (от мальков до взрослых или только взрослых особей), что могло повлиять на значение степени взаимосвязи ферментов с размерами.

Как известно, возраст, стадия развития и пол оказывают существенное влияние на энергетический и пластический обмен рыб [13], и эти факторы должны обязательно учитываться при проведении подобного рода исследований. В частности, нами была изучена зависимость активности ферментов аэробного и анаэробного синтеза АТФ и размерно-весовых характеристик у разновозрастных групп ряпушки *Coregonus albula* [4] и сига *Coregonus lavaretus* [11]. Показано, что, несмотря на снижение активности ЦО и МДГ белых мышц с возрастом, внутри групп одновозрастных рыб корреляция активности ферментов с массой и длиной особей была положительная. При исследовании искусственно выращиваемой микижи *Parasalmo mykiss* [12] установлена достоверная корреляция длины и массы рыб с активностью ферментов ЦО и ЛДГ белых мышц и уровнем экспрессии гена тяжелой цепи миозина. При этом уровень экспрессии гена миозина и активность ЛДГ, а также значение коэффициента их корреляции с размерами и между собой были выше у микижи 2+ по сравнению с особями возраста 1+. Это, видимо, связано с тем,

что у трехлеток (2+) прирост скелетной мускулатуры и массонакопление происходят более интенсивно, чем у двухлеток (1+), при этом у самцов уровень синтеза мышечного белка в том и другом возрасте значительно выше, чем у самок.

Для ферментов анаэробного обмена в некоторых исследованиях также показано различие во взаимосвязи с размерами, связанное с возрастом. Так, для ювенильных особей колюшки *Gasterosteus aculeatus* наблюдалась положительная корреляция ЛДГ с массой, а для взрослых особей зависимости не было [22]. В исследованиях Нортон с коллегами [37] на морском серебристом окуне *Morone Saxatilis* W. было показано, что активность ЛДГ и ПК была положительной для маленьких рыб, для особей с весом больше одного килограмма взаимосвязи с размерами не наблюдалось.

Характер взаимосвязи активности ферментов энергетического обмена с размерами особей определяется не только возрастом рыб, но и их образом жизни. Так, было показано, что взаимосвязь активности ферментов гликолиза с массой тела у наиболее активных пелагических видов рыб была положительной, в отличие от малоактивных бентосных видов, у которых эта взаимосвязь не установлена или была отрицательной [20], [43], [45]. Кроме того, у рыб пелагических видов активность ЛДГ, ПК в скелетных мышцах выше по сравнению с бентосными видами [20], [43]. Было предположено, что менее активные рыбы, ведущие «спокойный» образ жизни, не нуждаются в дополнительной энергии гликолиза по мере увеличения размеров.

Таким образом, литературные и собственные данные указывают на наличие сложной взаимосвязи между активностью ферментов энергетического обмена в мышцах и размерами тела рыб, зависящей от возраста особей, пола, стадии зрелости, видовых особенностей. При этом большинство исследователей отмечают тенденцию снижения уровня аэробного обмена и увеличения степени анаэробного обмена в ходе развития рыб с увеличением их возраста и массы.

РЕГУЛЯЦИЯ АКТИВНОСТИ НЕКОТОРЫХ ФЕРМЕНТОВ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО ОБМЕНА ПРИ ФОРМИРОВАНИИ РАЗМЕРНОЙ РАЗНОКАЧЕСТВЕННОСТИ РЫБ

В последние годы механизмы и закономерности роста, развития, формирования размерной разнокачественности рыб активно изучаются не только на биохимическом, но и на молекулярно-генетическом уровне. До сих пор остается открытым вопрос о том, регулируется ли изменение активности ферментов аэробного и анаэробного обмена, связанное с размерами тела рыб, на уровне транскрипции генов или на посттранскрипционном уровне [35]. Показана положительная корреляция активности и концентрации

мРНК пируваткиназы в белых мышцах с массой тела для годовиков заводской форели [16] и морских окуней четырех видов одного семейства ушастых окуней (Centrarchidae) [19]. Положительная корреляция уровня экспрессии гена ПК с размерами тела, а также активностью фермента свидетельствует о регуляции концентрации фермента с увеличением массы тела на уровне транскрипции. Однако для форели массой больше килограмма [16] такой взаимосвязи не было установлено, при этом значение концентрации мРНК ПК было ниже. Авторы объясняют это тем, что с возрастом у более крупных особей в мышцах, возможно, меняется скорость синтеза и распада белков, в связи с чем требуется меньшее количество мРНК.

Исследования Янга и Сомеро [46] по взаимосвязи экспрессии гена лактатдегидрогеназы-А *LDH-A* в белых мышцах с размерами особей полосатого песчаного окуня *Paralabrax nebulifer* установили наличие положительной взаимосвязи активности ЛДГ с массой тела и отсутствие корреляции количества мРНК *LDH-A* с массой. Также отсутствовала корреляция между активностью фермента и уровнем экспрессии гена, что предполагает наличие регуляции концентрации фермента на посттранскрипционном уровне. В проведенном нами исследовании [11] по взаимосвязи активности ЛДГ, уровня экспрессии гена *LDH-A* с размерами сигов двух возрастных групп 2+ и 3+ наблюдалась корреляция количества мРНК *LDH-A* с размерами особей и активностью ЛДГ независимо от возраста. Можно предположить, что механизмы регуляции активности ферментов могут зависеть от видовых особенностей рыб. На различия в результатах исследований могут влиять также особенности выборки рыб. В частности, Янг и Сомеро [46] исследовали рыб разных возрастных групп большого размерного ряда весом от 60 до 1500 г. В нашем исследовании разброс показателей массы был меньше (50–110 г) и учитывался возраст рыб.

Изучение уровня экспрессии гена цитратсинтазы, проведенное на ушастых окунях [19] и годовиках форели [16], не показало взаимосвязи количества мРНК с активностью фермента и массой тела особей.

В наших собственных исследованиях изучали соотношение активности фермента цитрохром-оксидазы, уровня экспрессии гена ее субъединицы IV (*COX IV*) в белых мышцах с размерами разновозрастных особей микижи [12] и сигов [11]. Следует уточнить, что молекула цитрохром с оксидазы состоит из 13 субъединиц: 3 основных каталитических (*COX I*, II, III), кодируемых митохондриальным геномом, и 10 минорных, которые кодируются ядерным геномом. Функции ядерных субъединиц, вероятно, связаны с регуляцией активности цитрохром с оксидазы и также определяют тканевую специфичность фер-

мента. Субъединица IV цитрохром с оксидазы является необходимой для сборки структуры и аллостерической регуляции активности фермента [31]. Для микижи было показано, что корреляция уровня экспрессии гена *COX IV* в белых мышцах с размерами особей и активностью фермента была характерна только для двухлеток (1+). У трехлеток (2+) коррелировали только активность ЦО с размерами рыб и отсутствовала корреляция с уровнем экспрессии гена. Можно предположить, что механизмы регуляции активности ферментов при формировании размерных вариаций рыб могут изменяться с их возрастом. Возможно, у двухлеток микижи регуляция активности фермента осуществляется преимущественно на уровне транскрипции, а у трехлеток – на посттранскрипционном уровне. С возрастом у микижи снижалась и активность, и уровень экспрессии мРНК *COX-IV*. У сигов возрастом 2+ и 3+, несмотря на снижение активности ЦО и уровня экспрессии гена *COX IV* с возрастом, внутри возрастной группы с увеличением массы усиливается экспрессия гена *COX IV* и активность этого фермента.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Анализ имеющейся литературы и собственных данных показывает, что у быстрорастущих и крупных рыб уровень активности ферментов аэробного метаболизма (цитрохромоксидазы, цитратсинтазы, малатдегидрогеназы и ферментов гликолиза (пируваткиназы и лактатдегидрогеназы)) значительно выше, чем у медленно растущих и мелких особей. Это объясняется тем, что активный рост и развитие молоди рыб сопровождается усилением синтеза структурных и запасных веществ, увеличением содержания сократительных белков в мышцах, высокой локомоторной активностью и приростом мышечной массы, а это, в свою очередь, требует высоких энергетических затрат. На характер взаимосвязи активности ферментов с размерами или темпами роста рыб оказывает влияние их возраст, поли условия окружающей среды. Изучение механизмов и закономерностей регуляции процессов энергетического и пластического обмена рыб при формировании вариаций в размерах и темпах роста молоди рыб указывает на то, что изменение активности ферментов по мере увеличения массы тела или возраста рыб может регулироваться на различных уровнях – транскрипционном и посттранскрипционном. Однако этот вопрос еще требует тщательного изучения. Активность ферментов аэробного и анаэробного обмена наряду с другими биохимическими и молекулярно-генетическими показателями (РНК/ДНК, уровень экспрессии генов ферментов и сократительных белков) могут использоваться в оценке темпов роста рыб и их состояния, при построении моделей развития молоди при изме-

нении условий окружающей среды и питания, условий выращивания.

Собственные исследования, упомянутые в данной работе, выполнены при поддержке гранта Президента РФ для государственной поддержки научных исследований, проводимых ведущими научными школами РФ НШ-3731.2010.4;

гранта РФФИ № 11-04-00167-а; проектов Программы ФЦП «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России на 2009–2013 гг.» (№ г. к. 02.740.11.0700, 14.740.11.1034); программы фундаментальных исследований ОБН РАН «Биологические ресурсы России 2009–2011 гг.».

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бретт Дж. Р., Гроувс Т. Д. Д. Физиологическая энергетика // Биоэнергетика и рост рыб: Пер. с англ. / Под ред. У. Хоара, Д. Рендолла, Дж. Бретт. М.: Легкая и пищевая пром-сть, 1983. 408 с.
2. Дгебуадзе Ю. Ю. Экологические закономерности изменчивости роста рыб. М.: Наука, 2001. 276 с.
3. Мещерякова О. В., Груздев А. И., Немова Н. Н. Сравнительная энзиматическая оценка углеводного обмена окуней *Perca fluviatilis* L. из водоемов с различным уровнем содержания гуминовых кислот // Известия РАН. Сер. биологическая. 2004. № 1. С. 21–26.
4. Мещерякова О. В., Чурова М. В., Немова Н. Н. Биохимические методы оценки роста и развития рыб. Корреляции активности некоторых ферментов метаболизма с показателями веса и роста особей у разных возрастных групп ряпушки оз. Сямозеро (Республика Карелия) // Материалы Всерос. конф. с междунар. участием «Водные и наземные экосистемы: проблемы и перспективы исследований». Вологда, 2008. С. 71–75.
5. Немова Н. Н. Биохимические эффекты накопления ртути у рыб. М.: Наука, 2005. 157 с.
6. Немова Н. Н., Высоцкая Р. У. Биохимическая индикация состояния рыб. М.: Наука, 2004. 215 с.
7. Новиков Г. Г. Рост и энергетика развития костистых рыб в раннем онтогенезе. М.: Эдиториал УРСС, 2000. 296 с.
8. Озернюк Н. Д. Биоэнергетика онтогенеза. М.: Изд-во МГУ, 2000. 259 с.
9. Павлов Д. С., Мещерякова О. В., Веселов А. Е., Немова Н. Н., Лупандин А. И. Показатели энергетического обмена у молоди атлантического лосося (*Salmo salar* L.), обитающей в главном русле и притоке реки Варзуга (Кольский полуостров) // Вопросы ихтиологии. 2007. Т. 47. С. 819–826.
10. Хочачка П., Сомеро Д. Биохимическая адаптация: Пер. с англ. М.: Мир, 1988. 586 с.
11. Чурова М. В., Мещерякова О. В., Немова Н. Н. Взаимосвязь линейно-весовых характеристик с активностью некоторых ферментов и молекулярно-генетическими показателями в белых мышцах сигов разных возрастных групп из озера Каменное (Республика Карелия) // Современные проблемы физиологии и биохимии водных организмов. Т. I. Петрозаводск: Карельский научный центр РАН, 2010. 320 с.
12. Чурова М. В., Мещерякова О. В., Немова Н. Н., Шатуновский М. И. Соотношение роста и некоторых биохимических показателей рыб на примере микижи *Parasalmo mykiss* Walb. // Известия РАН. Сер. «Биология». 2010. № 3. С. 289–299.
13. Шатуновский М. И. Эколого-физиологические подходы к периодизации онтогенеза рыб // Экологические проблемы онтогенеза рыб: физиолого-биохимические аспекты. М.: Изд-во МГУ, 2001. С. 13–19.
14. Ahmad R., Hasnain A. U. Ontogenetic changes and developmental adjustments in lactate dehydrogenase isozymes of an obligate air-breathing fish *Channa punctatus* during deprivation of air access // Comp. Biochem. Physiol. B. Biochem. Mol. Biol. 2005. Vol. 140. P. 271–278.
15. Burgetz I. J., Rojas-Vargas A., Hinch S. G., Randall D. J. Initial recruitment of anaerobic metabolism during sub-maximal swimming in rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss*) // J. Exp. Biol. 1998. Vol. 201. P. 2711–2721.
16. Burness G. P., Leary S. C., Hochachka P. W., Moyes C. D. Allometric scaling of RNA, DNA, and enzyme levels in fish muscle // Am. J. Physiol. 1999. Vol. 277. P. R1164–R1170.
17. Childress J. J., Somero G. N. Metabolic Scaling: A New Perspective Based on Scaling of Glycolytic Enzyme Activities // American Zoologist. 1990. Vol. 30. P. 161–173.
18. Couture P., Dutil J.-D., Guderley H. Biochemical correlates of growth and condition in juvenile Atlantic cod (*Gadus morhua*) from Newfoundland // Can. J. Fish. Aquat. Sci. 1998. Vol. 55. P. 1591–1598.
19. Davies R., Moys C. D. Allometric scaling in centrarchid fish: origins of intra- and inter-specific variation in oxidative and glycolytic enzyme levels in muscle // The Journal of Experimental Biology. 2007. Vol. 210. P. 3798–3804.
20. Drazen J. C., Seibel B. A. Depth-related trends in metabolism of benthic and benthopelagic deep-sea fishes // Limnol. Oceanogr. 2007. Vol. 52. P. 2306–2316.
21. Foster A. R., Houlihan D. F., Hall S. I. Effects of Nutritional Regime on Correlates of Growth Rate in Juvenile Atlantic Cod (*Gadus morhua*): Comparison of Morphological and Biochemical Measurements // Can. J. Fish. Aquat. Sci. 1993. Vol. 50. P. 502–512.
22. Garenc C., Couture P., Laflamme M.-A., Guderley H. Metabolic correlates of burst swimming capacity of juvenile and adult threespine stickleback (*Gasterosteus aculeatus*) // Journal of Comparative Physiology B: Biochemical, Systemic, and Environmental Physiology. 1999. Vol. 169. P. 113–122.
23. Gauthier C., Campbell P., Couture P. Physiological correlates of growth and condition in the yellow perch (*Perca flavescens*) // Comparative Biochemistry and Physiology, Part A. 2008. Vol. 151. P. 526–532.
24. Goolish E. M. Aerobic and anaerobic scaling in fish // Biological Reviews. 1991. Vol. 66. P. 33–56.
25. Goolish E. M., Adelman I. R. Tissue specific cytochrome c oxidase activity in largemouth bass: the metabolic cost of feeding and growth // Physiological Zoology. 1987. Vol. 60. P. 454–464.
26. Guderley H. Locomotor performance and muscle metabolic capacities: impact of temperature and energetic status // Comp. Biochem. Physiol. B. Biochem. Mol. Biol. 2004. Vol. 139. P. 371–382.
27. Houlihan D. F., Mathers E. M., Foster A. Biochemical correlates of growth rate in fish // Fish Ecophysiology / J. C. Rankin, F. B. Jensen. Chapter 2. London, UK, 1993. P. 45–71.
28. Imsland A. K., Le Francois N. R., Lammare S. G., Ditlecadet D., Sigurosson S., Foss A. Myosin expression levels and enzyme activity in juvenile spotted wolffish (*Anarhichas minor*) muscle: a method for monitoring growth rates // Can. J. Fish. Aquat. Sci. 2006. Vol. 63. P. 1959–1967.

29. Kaupp S. E. The ontogenetic development of the metabolic enzymes citrate synthase and lactate dehydrogenase in the swimming muscles of larval and juvenile fishes: M. S. thesis. University of California, San Diego, 1987.
30. Koedijk R. M., Le François N. R., Blier P. U., Foss A., Folkvord A., Ditlecadet D., Lamarre S. G., Stefansson S. O., Imsland A. K. Ontogenetic effects of diet during early development on growth performance, myosin mRNA expression and metabolic enzyme activity in Atlantic cod juveniles reared at different salinities // *Comp. Biochem. Physiol. A Mol. Integr. Physiol.* 2010. Vol. 156. P. 102–109.
31. Ludwig B., Bender E., Arnold S., Hüttemann M., Lee I., Kadenbach B. Cytochrome C oxidase and the regulation of oxidative phosphorylation // *Chembiochem.* 2001. Vol. 2. P. 392–403.
32. Mathers E. M., Houlihan D. E., Cunningham M. J. Nucleic acid concentrations and enzyme activities as correlates of growth rate of the saithe *Pollachius virens*: growth-rate estimates of open-sea fish // *Marine Biology.* 1992. Vol. 112. P. 363–369.
33. Mommsen T. P. Paradigms of growth in fish // *Comp. Biochem. and Physiol. Part B.* 2001. Vol. 129. P. 207–219.
34. Morbey Y. E., Couture P., Busby P., Shuter B. J. Physiological correlates of seasonal growth patterns in lake trout *Salvelinus namaycush* // *Journal of Fish Biology.* 2010. Vol. 77. P. 2298–2314.
35. Moyes C. D., Genge C. E. Scaling of muscle metabolic enzymes: an historical perspective // *Comp. Biochem. Physiol. A. Mol. Integr. Physiol.* 2010. Vol. 156. P. 344–350.
36. Nathanailides C., Stickland N. C. Activity of cytochrome c oxidase and lactate dehydrogenase in muscle tissue of slow growing (lower modal group) and fast growing (upper modal group) Atlantic salmon // *Journal of Fish Biology.* 1996. Vol. 48. P. 549–551.
37. Norton S. E., Eppley Z. A., Sidell B. D. Allometric scaling of maximal enzyme activities in the axial musculature of striped bass, *Morone saxatilis* (Walbaum) // *Physiol. Biochem. Zool.* 2000. Vol. 73. P. 819–828.
38. Parke D. V. Molecular mechanisms of chemical toxicity // *Pol. J. Occup. Med.* 1988. Vol. 1. P. 18–38.
39. Pelletier D., Dutil J. D., Blier P., Guderley H. Relation between growth rate and metabolic organization of white muscle, liver and digestive tract in cod, *Gadus morhua* // *J. Comp. Physiol. B.* 1994. Vol. 164. P. 179–190.
40. Pelletier D., Guderley H., Dutil J. D. Does the aerobic capacity of fish muscle change with growth rates? // *Fish Physiol. Biochem.* 1993. Vol. 12. P. 83–93.
41. Richards J. G. Metabolic and Molecular Responses of Fish to Hypoxia // *Fish Physiology.* Vol. 27. Hypoxia / Ed. by J. G. Richards, A. P. Farrell, C. J. Brauner. San Diego: Elsevier, 2009. P. 443–485.
42. Somero G. N., Childress J. J. A violation of the metabolism-size scaling paradigm: activities of glycolytic enzymes in muscle increase in larger size fish // *Physiol. Zool.* 1980. Vol. 53. P. 322–337.
43. Somero G. N., Childress J. J. Scaling of ATP-supplying enzymes, myofibrillar proteins and buffering capacity in fish muscle: relationship to locomotory habit // *J. Exp. Biol.* 1990. Vol. 149. P. 319–333.
44. Tripathi G. Scaling of cytoplasmic and mitochondrial enzymes and proteins in skeletal muscle of a catfish // *J. Anim. Physiol. A.* 1999. 83. P. 50–56.
45. Vetter R. D., Lynn E. A., Garza M., Costa A. S. Depth zonation and metabolic adaptation in Dover sole, *Microstomus pacificus*, and other deep-living flatfishes: factors that affect the sole // *Marine Biology.* 1994. Vol. 120. P. 145–159.
46. Yang T. H., Somero G. N. Activity of lactate dehydrogenase but not its concentration of messenger RNA increases with body size in barred sand bass, *Paralabrax nebulifer* (Teleostei) // *Biol. Bull.* 1996. Vol. 191. P. 155–1588.

ТАТЬЯНА АЛЕКСЕЕВНА КАРАПЕТЯН

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

НАТАЛЬЯ ВЛАДИМИРОВНА ДОРШАКОВА

доктор медицинских наук, профессор, заведующий кафедрой семейной медицины (общей врачебной практики) медицинского факультета, Петрозаводский государственный университет
dorshakova@karelia.ru

КСЕНИЯ АЛЕКСАНДРОВНА НИКИТИНА

ассистент кафедры семейной медицины (общей врачебной практики) медицинского факультета, Петрозаводский государственный университет
nikxen@yandex.ru

СОВРЕМЕННЫЕ ВОЗМОЖНОСТИ ПРОФИЛАКТИКИ ЗАБОЛЕВАНИЙ, ВЫЗЫВАЕМЫХ *STREPTOCOCCUS PNEUMONIAE*, У НАСЕЛЕНИЯ РАЗНЫХ ВОЗРАСТНЫХ ГРУПП

В статье приводится спектр заболеваний, вызванных *S. pneumoniae*, и обсуждаются возможности профилактики их развития у взрослого и детского населения с применением современных вакцинных препаратов.

Ключевые слова: пневмококковые инфекции, вакцина, население

Менингит, средний отит, фарингит, синусит, внебольничная пневмония, острый и обострение хронического бронхита, эндокардит, артрит – вот неполный перечень инфекционно-воспалительных заболеваний, развитие которых в разных возрастных группах вызывает *Streptococcus pneumoniae*. К инвазивным формам пневмококковой инфекции относят пневмонию, менингит и бактеремию.

ВОЗ считает пневмококковую инфекцию ведущей причиной заболеваемости и смертности во всех регионах мира, при этом ее роль наиболее велика среди детей первых лет жизни, пожилых людей и лиц с хроническими болезнями: ежегодно от пневмококковой инфекции умирают 1,6 млн человек, из них от 700 тыс. до 1 млн детей в возрасте до пяти лет, живущих главным образом в развивающихся странах [23]. Однако следует отметить, что данные по распространности пневмококковой инфекции существенно занижаются, так как *S. pneumoniae* как возбудитель не всегда верифицируется в связи с амбулаторными условиями лечения ряда пациентов и существующими сложностями лабораторной диагностики.

Глобальную проблему представляет и рост числа антибиотикорезистентных штаммов микроорганизма, выделяемых при различных нозологиях, что приводит к увеличению затрат на лечение [4]. В разных странах уровень устойчивости *S. pneumoniae* существенно отличается. В азиатских государствах, Франции, Венгрии, Испании и США доля штаммов микроорганиз-

ма, толерантных к пенициллину, макролидам, тетрациклину и ко-тримоксазолу, а также проявляющих мультирезистентность, достаточно велика. Россия пока относится к странам с благоприятной эпидемиологической обстановкой: по данным исследований ПеГАС-II, частота выделения пенициллинорезистентных пневмококков не превышает 10 %, низкой является устойчивость к макролидам в целом, однако нечувствительность к тетрациклину и ко-тримоксазолу значительна: 29,6 и 40,8 % соответственно; 9,6 % штаммов микроорганизма полирезистентны, что требует проведения постоянного мониторинга чувствительности [7].

S. pneumoniae представляет собой грамположительный диплококк, окруженный полисахаридной капсулой, которая является главным фактором вирулентности микроорганизма вследствие способности ослаблять фагоцитоз нейтрофилов и макрофагов [17]. Исходя из строения и антигенных свойств капсулы выделяют 91 серотип бактерии [22], при этом доказано, что лишь 25 % всех известных серотипов широко циркулируют среди населения, вызывая развитие большинства заболеваний, и только 20 ассоциированы с более чем 80 % инвазивных пневмококковых инфекций.

Новорожденные получают антитела ко многим типам *S. pneumoniae* от матери, но по мере снижения их уровней пневмококковая заболеваемость повышается, очень значительно – с шестимесячного возраста. Далее до 3 лет уровень антител к *S. pneumoniae* остается низким, дости-

гая такового у взрослых только в школьном возрасте. Это делает детей раннего возраста особо восприимчивыми к пневмококковой инфекции [12], [19]. Другая группа риска – пожилые люди, у которых происходит угасание противопневмококкового иммунитета, а также больные хроническими заболеваниями, сопровождающимися иммунодефицитом (сахарный диабет, цирроз печени и пр.).

S. pneumoniae – частый обитатель верхних дыхательных путей человека. Именно носители пневмококка являются резервуаром инфекции и способствуют ее распространению. Частота носительства нарастает в течение первого года жизни, особенно высока она в детских дошкольных учреждениях, где может достигать 50 %, а затем снижается: в начальной школе до 35 %, а в старших классах – до 25 %. Взрослые, проживающие совместно с детьми, имеют более высокий уровень носительства (18–29 %), чем живущие без детей (6 %) [6]. Интересно, что носительство одного типа пневмококка может продлиться от одного до нескольких месяцев, затем микроорганизм элиминируется, что, однако, не препятствует колонизации другим типом бактерии.

Несмотря на наличие эффективных антибактериальных препаратов, имеющих сегодня в распоряжении медицины для борьбы с инфекцией, вызываемой *S. pneumoniae*, ВОЗ считает, что «вакцинация – единственный способ существенно повлиять на заболеваемость пневмококковой инфекцией. Повышение уровня антибиотикорезистентности особенно подчеркивает важность иммунопрофилактики» [23]. Неслучайно уже в 1946 году была предложена первая 6-валентная полисахаридная пневмококковая вакцина (PPV6), в 1977-м начато применение 14-валентной (PPV14), а в 1981-м – 23-валентной вакцины (PPV23), которая до последнего времени была основной в практической медицине. Она содержит по 25 мкг капсулярных полисахаридных антигенов *S. pneumoniae* серотипов 1-5, 6B, 7F, 8, 9N, 9V, 10A, 1 A, 12F, 14, 15B, 17F, 18C, 19A, 19F, 20, 22F, 23F и 33F и используется в настоящее время. Микроорганизмы указанных серотипов, согласно эпидемиологическим исследованиям в разных странах, вызывают до 90 % инвазивных заболеваний у взрослых. В течение двух недель после вакцинации концентрация специфических антител возрастает в 2 раза и более у 80 % привитых здоровых молодых взрослых. Для большинства входящих в вакцину антигенов уровень антител превышает допрививочные титры у здоровых лиц в течение 5 лет и более, но их концентрация быстрее снижается у пожилых. Иммунный ответ не является одинаковым и постоянным ко всем 23 вакцинным серотипам и существенно различается у привитых лиц. Несмотря на то что и у пациентов в возрасте 85 лет и старше отмечается значительный им-

мунный ответ на вакцину, ее более низкая эффективность может быть связана с функциональными различиями антител у пожилых и молодых. Важную роль играют и генетические факторы. Итоги эпидемиологических исследований подтвердили эффективность вакцины в профилактике инвазивных инфекций у пожилых лиц и у пациентов в возрасте 2 лет и старше с определенными хроническими заболеваниями. Только в одном исследовании «случай-контроль» не выявлена эффективность превенции бактериемии, вероятно, вследствие его ограниченности. Общая эффективность вакцинации в профилактике инвазивных инфекций у лиц в возрасте 65 лет и старше составляет 75 %, однако она может снижаться со старением.

Комитет советников по иммунизационной практике определил контингенты населения, подлежащие вакцинации вследствие риска развития инфекций, вызванных *S. pneumoniae* (см. таблицу) [15]. Вспышки пневмококковых пневмоний в домах престарелых, где было вакцинировано только 5 % лиц, подтверждают необходимость иммунизации проживающих там лиц.

В России 23-валентная пневмококковая вакцина «Пневмо 23» компании Авантис Пастер (Франция) зарегистрирована в 1999 году. Препарат содержит 85 % серотипов *S. pneumoniae*, циркулирующих в Европе, 90 % серотипов, устойчивых к пенициллину. По данным российских авторов, вакцина включает около 80 % серотипов пневмококка, полученных у здоровых носителей и больных ОРЗ, и 92 % серотипов, полученных у больных острыми бронхитами и пневмониями. В России накоплен значительный опыт применения «Пневмо 23». Высокая эпидемиологическая эффективность вакцины для профилактики внебольничных пневмоний, достигающая 80 %, показана при иммунизации армейских коллективов Дальневосточного военного округа (охват вакцинацией составил 99 % молодого пополнения) и других воинских контингентов. Согласно другому исследованию, в течение 2–5 месяцев после прививки заболеваемость среди вакцинированных острым бронхитом, пневмонией и ОРЗ была достоверно ниже, чем у непривитых: в 13,0, 6,1 и 2,2 раза соответственно. Применение «Пневмо 23» у промышленных рабочих привело к достоверному уменьшению частоты обострений хронической обструктивной болезни легких (ХОБЛ) в 4,8 раза и снижению затрат на предотвращение одного обострения в год в 2,6 раза [10], что подтверждает необходимость вакцинации страдающих данной патологией [2]. Таким образом, существует значительная эпидемиологическая эффективность вакцины не только в отношении пневмококковых пневмоний, но и острых бронхитов, ОРЗ, а также обострений ХОБЛ, в этиологии которых доля *S. pneumoniae* весьма существенна.

Рекомендации Комитета советников
по иммунизационной практике
по использованию пневмококковой
полисахаридной вакцины [21]

Популяции, которым рекомендована вакцинация	Доказа- тельность рекомен- дации	Ревакцинация ¹
Пациенты в возрасте 65 лет ² и старше без иммунодефицита	A	Рекомендована, если вакцина введе- на более 5 лет назад и в момент ее при- менения пациенту было меньше 65 лет
Лица в возрасте от 2 до 65 лет ² с хроническими забо- леваниями: сердечно-сосудистой и бронхолегочной системы (застойная сердечная не- достаточность, кардиоми- опатия, ХОБЛ, эмфизема легких и др.), сахарным диабетом; алкоголизмом, циррозом печени, ликвореей	A B	Не рекомендуется
Лица в возрасте от 2 до 65 лет с функциональной или анатомической аспле- нией (с серповиднокле- точной анемией, после спленэктомии и др.)	A	Рекомендована, если возраст старше 10 лет, через 5 лет после предыдущей
Лица в возрасте от 2 до 65 лет, живущие в опреде- ленных условиях окру- жающей среды, или из осо- бой специальной среды (аборигены Аляски и др.)	C	Не рекомендуется
Лица с иммунодефицит- ными состояниями в воз- расте старше 2 лет, вклю- чая пациентов с ВИЧ- инфекцией, лейкоемией, болезнью Ходжкина, мно- жественной миеломой, генерализованными зло- качественными образова- ниями, проходящим им- муносупрессивную тера- пию, с ХПН, нефротичес- ким синдромом, с орган- ной недостаточностью или трансплантатом кост- ного мозга	C	Рекомендована, если прошло как минимум 5 лет с момента получения первой дозы

Примечание.

¹ Доказательность для всех рекомендаций по ревакцинации – С.

² Если иммунный статус неизвестен, пациентам этих групп рекомендована вакцинация.

Результаты исследований в педиатрии свидетельствуют о хорошей переносимости и клинико-иммунологической эффективности «Пневмо 23», что позволяет рекомендовать ее использование в комплексном лечении детей с латентной туберкулезной инфекцией, бронхиальной астмой, частыми рецидивами хронической бронхолегочной патологии, ЛОР-заболеваний [1], [8], [9].

Применение вакцины в домах ребенка продемонстрировало снижение частоты носительства *S. pneumoniae* (в том числе резистентного к антибактериальным препаратам) с 40 до 15 %, а также, что неожиданно, уменьшение заболевае-

мости ОРЗ, хотя эта патология часто имеет вирусную природу. При этом вакцина вызывает минимум побочных эффектов: около 3 % детей отмечали незначительные местные реакции и менее 1 % – общие реакции. Введение «Пневмо 23» в комплексе как с вакцинами календаря прививок (живой коревой и живой паротитной), так и с противогриппозной «Ваксигрипп» и антигемофильной «Акт-Хиб» безопасно и не отражается на иммуногенности. Противопневмококковая вакцинация может проводиться круглогодично.

Таким образом, в распоряжении врачей имеется безопасное и эффективное средство профилактики распространенной среди взрослых и детей пневмококковой инфекции. Однако наибольшую опасность представляют заболевания, вызываемые *S. pneumoniae*, у лиц в возрасте до 2 лет. К сожалению, полисахаридная вакцина, представляя собой Т-независимые антигены, недостаточно стимулирует иммунный ответ у ребенка младше 2 лет: клинические испытания показали ее низкую эффективность или отсутствие таковой. Кроме того, для большинства серотипов микроорганизма, которые чаще вызывают заболевания у данной категории пациентов (6А, 14, 19F и 23F), иммунный ответ является недостаточным и у детей в возрасте младше 5 лет. Серьезным достижением в вопросах разработки вакцин стало изобретение в середине 80-х годов прошлого столетия процесса конъюгации, благодаря которому полисахаридный антиген связывается с носителем [22], [23], при этом иммунный ответ становится Т-зависимым и как следствие подобная вакцина стимулирует более высокий антигенный ответ у детей раннего возраста. Одновременно происходит выработка В-лимфоцитов памяти и прайминг для последующей ревакцинации полисахаридной вакциной.

В 2000 году в США, а затем и в других странах [16], [21] была зарегистрирована конъюгированная 7-валентная вакцина (PCV7) – «Превнар» (Вайет, США), представляющая собой стерильный раствор сахаридов капсулярных антигенов пневмококка (по 2 мкг капсулярных полисахаридов серотипов 4, 9V, 14, 19F и 23F; по 2 мкг олигосахаридов серотипов 18С; 4 мкг полисахаридов серотипа 6В), конъюгированных с дифтерийным CRM₁₉₇ белком. Для усиления иммунного ответа использован адъювант – фосфат алюминия. Серотип 6В является родственным по отношению к серотипу 6А, который не включен в вакцину, что увеличивает ее антигенное разнообразие. Данная вакцина может назначаться одновременно с другими при условии использования разных шприцев и мест инъекций. Побочные эффекты от ее применения выражаются в местных реакциях и развиваются не чаще, чем при использовании других вакцин для детей. Вакцинация может проводиться с возраста 6 недель и должна быть начата до 6-месячного возраста.

Эффективность PCV7 была доказана в крупных исследованиях. Так, выполненное организацией по обеспечению медицинской помощи Northern California Kaiser Permanente исследование, включавшее более 37 тыс. детей, показало, что «Превнар» на 94,5 % эффективен в профилактике инвазивных пневмококковых заболеваний, вызываемых содержащимися в вакцине серотипами [13]. Центр по контролю и профилактике заболеваний в США сообщил о снижении частоты инвазивной пневмококковой инфекции на 69 % в 2001 году по сравнению с 1998-м среди детей моложе 2 лет после начала плановой вакцинации в 2000 году; при этом уменьшение заболеваемости инвазивными формами пневмококковой инфекции, обусловленными вакцинными серотипами возбудителя, составило 78 %. В результате крупнейшего статистического исследования, проведенного в США, было выявлено снижение на 65 % частоты госпитализации среди детей до 2 лет по поводу пневмококковой пневмонии через 5 лет после введения программы иммунизации PCV7 детей. Одновременно отмечалось снижение на 39 % госпитализации младенцев по поводу пневмоний любой этиологии в сравнении с периодом до начала вакцинации. Профилактическая эффективность PCV7 в отношении острого среднего отита была описана Zhou F. et al. в виде снижения на 42,7 % случаев обращаемости к врачу по поводу этого заболевания и уменьшения на 41,9 % числа назначений антибактериальной терапии в 2004 году против 1997–1999 годов [24]. Вакцина оказалась эффективной и безопасной и у недоношенных детей.

Интересно, что включение «Превнара» в Национальные программы иммунизации привело не только к снижению заболеваемости пневмококковой инфекцией среди привитых, но и к неожиданному уменьшению пневмококковых заболеваний в невакцинированной популяции. В период 1998–2001 годов частота инвазивной пневмококковой инфекции среди взрослых в возрасте 20–39 лет снизилась на 32 %, в возрастной категории 40–64 лет – на 8 %, среди пожилых лиц старше 65 лет – на 18 %, а к 2003 году эти цифры стали еще более впечатляющими: снижение достигло 41, 20 и 31 % соответственно [14]. Достижение определенной пропорции иммунизированных детей приводит к блокированию трансмиссии возбудителей инфекций в детских коллективах и передачи их от ребенка ко взрослому. Эпидемиологи называют это «эффектом стада», но пока неизвестно, какой процент детей должен быть иммунизирован для его получения; и хотя данный феномен значим с позиций эпидемиологических перспектив, прямая польза от вакцинации, безусловно, гораздо существеннее.

Вакцинация «Превнаром» позволяет решить и проблему устойчивости *S. pneumoniae* к антибиотикам, которая лежит в основе развития тя-

желых форм пневмококковых заболеваний, трудно поддающихся лечению и приводящих к серьезным осложнениям и исходам. Антибиотикорезистентность пневмококка чаще встречается среди штаммов микроорганизма, наиболее широко распространенных у детей, – 6, 14, 19 и 23-го [20], поэтому включение их серотипов в вакцину снизило частоту заболеваний, вызываемых толерантными *S. pneumoniae*, у данной категории населения, а вследствие уменьшения трансмиссии – и у взрослых лиц. Так, в США среди детей до 2 лет заболеваемость, вызванная пенициллинорезистентными штаммами, снизилась с 70,3 до 13,1 случая на 100 000 (всего на 81 %), а среди лиц старше 65 лет – с 16,4 до 8,4 случая на 100 000 населения (всего на 49 %) [18]. Однако параллельно увеличивается частота встречаемости других резистентных штаммов микроорганизма, что требует определенного внимания.

В настоящее время 7-валентная пневмококковая конъюгированная вакцина «Превнар» разрешена к применению более чем в 90 странах мира и в 28 из них (США, Великобритания, Германия, Франция, Канада, Норвегия и др.) включена в Национальные календари обязательных профилактических прививок. Актуальность применения PCV7 в европейских странах объясняется тем, что вакцина включает 70–88 % наиболее распространенных в Европе штаммов *S. pneumoniae*, в том числе антибиотикорезистентных: 80 % штаммов, устойчивых к пеницилину, и 99 % штаммов, толерантных к эритромицину. В России, согласно проведенным среди детского населения исследованиям, на долю серотипов *S. pneumoniae*, входящих в состав или перекрестно реагирующих с гептавалентной конъюгированной пневмококковой вакциной, приходится от 72,2 % в европейской до 96,4 % в азиатской частях страны [5]. На территории Российской Федерации «Превнар» зарегистрирован в январе 2009 года.

Сегодня специфическая вакцинопрофилактика признана действенным методом борьбы с пневмококковой инфекцией. Иммунизация осуществляется с помощью вакцин, прошедших клинические и эпидемиологические испытания и позволивших существенно повлиять на эпидемический процесс. Разработаны официальные международные рекомендации, плановая иммунизация групп риска осуществляется в рамках Национальных календарей вакцинации многих развитых стран, что снижает число генерализованных форм пневмококковых заболеваний и бактерионосительство. Неслучайно продолжается создание новых и усовершенствование имеющихся вакцин [3], [11]: разработаны 9-, 11- и 13-валентная конъюгированные вакцины, которые охватывают больший спектр пневмококковых заболеваний, эффективны у детей до 5 лет и

у лиц с иммунодефицитами, обладают высокой иммуногенностью. Делаются попытки создать действенные и безопасные вакцины к некапсульным антигенам, общим для всех штаммов *S. pneumoniae*: поверхностным протеинам А и С,

адгезину А, пневмолизину, нейроминидазе и др. Прогнозируется, что к 2025 году в Национальный календарь прививок России войдут 23 вакцины для детей и 3 для взрослых, причем все они будут иммунизированы против пневмококка.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ахметсафина С. Д., Титлова И. В., Шукаева О. М. и др. Эффективность применения вакцины «Пневмо 23» в комплексном лечении детей с латентной туберкулезной инфекцией // Здравоохранение Башкортостана. 2006. № 4. С. 185–186.
2. Верткин А. Л., Аринина Е. Н., Журавлева О. В. Лечение, профилактика и вакцинопрофилактика хронической обструктивной болезни легких // Лечащий врач. 2006. № 9. С. 72–75.
3. Воробьев А. А., Егорова Н. Б., Захарова Н. С. и др. Прогноз в области создания вакцин нового поколения для вакцинопрофилактики и вакцинотерапии инфекционных и неинфекционных болезней // Пульмонология. 2005. № 6. С. 15–36.
4. Карапетян Т. А., Доршакова Н. В., Ларина Н. А. Этиология внебольничной пневмонии в Карелии // Врач. 2008. № 2. С. 39–41.
5. Козлов Р. С. Пути оптимизации мониторинга, профилактики и фармакотерапии пневмококковых инфекций: Автореф. дис. ... д-ра мед. наук. Смоленск, 2004. 46 с.
6. Козлов Р. С. Пневмококки: прошлое, настоящее и будущее. Смоленск: Смоленская медицинская академия, 2005. 128 с.
7. Козлов Р. С., Сивая О. В., Шпынев К. В. и др. Антибиотикорезистентность *Streptococcus pneumoniae* в России в 1999–2005 гг.: результаты многоцентровых проспективных исследований ПеГАС-I и ПеГАС-II // Клиническая микробиология и антимикробная химиотерапия. 2006. Т. 8. № 1. С. 33–47.
8. Маркелова Е. В., Гушина Я. С., Костинов М. П. и др. Клинико-иммунологический эффект вакцинации «Пневмо 23» детей с atopической бронхиальной астмой // Журнал микробиологии, эпидемиологии и иммунологии. 2005. № 2. С. 83–85.
9. Петрова Т. И., Андреева Н. П., Голубцова О. И. и др. Клинико-иммунологическая эффективность вакцинации детей с бронхиальной астмой против пневмококковой инфекции // Аллергология. 2006. № 4. С. 27–30.
10. Степанищева Л. А., Игнатова Г. Л., Федосова Н. С. и др. Эффективность вакцины «Пневмо 23» у рабочих с хронической обструктивной болезнью легких // Пульмонология. 2006. № 3. С. 56–59.
11. Таточенко В. К. Вакцинопрофилактика в XXI веке // Ремедиум. 2006. № 2. С. 14–20.
12. Baraff L. J., Lee S. I., Schriger D. L. Outcomes of bacterial meningitis in children a meta-analysis // Pediatrics Infect. Dis. J. 1993. № 12. P. 389–394.
13. Black S., Shinefield H., Baxter R. et al. Postlicensure surveillance for pneumococcal invasive disease after use of heptavalent pneumococcal conjugate vaccine in Northern California Kaiser Permanente // Pediatrics Infect. Dis. J. 2004. Vol. 23. P. 485–489.
14. Centers for Disease Control and Prevention. Direct and indirect effects of routine vaccination of children with 7-valent pneumococcal conjugate vaccine on incidence of invasive pneumococcal disease, United States, 1998–2003 // MMWR. 2005. Vol. 54(36). P. 893–897.
15. Centers for Disease Control and Prevention. Prevention of pneumococcal disease: recommendations of the Advisory Committee on Immunization Practices (ACIP) // MMWR. 1997. Vol. 46(8). P. 1–24.
16. Clarke S. C. Control of pneumococcal disease in the United Kingdom – the start of a new era // J. Med. Microbiol. 2006. Vol. 55 (Pt 8). P. 975–980.
17. Fine D. P. Pneumococcal type-associated variability in alternate complement pathway activation // Infect. Immun. 1975. Vol. 12. P. 772–778.
18. Kyaw M. H., Lynfield R., Schaffner W. et al. Effect of introduction of the pneumococcal conjugate vaccine on drug-resistant *Streptococcus pneumoniae* // N. Engl. J. Med. 2006. Vol. 354(14). P. 1455–1463.
19. McIntosh K. Community-acquired pneumonia in children // New Engl. J. Med. 2002. Vol. 346. P. 429–437.
20. Ortqvist A., Hedlund J., Kalin M. S. Pneumoniae: epidemiology, risk factors and clinical features // Semin. Respir. Crit. Care Med. 2005. Vol. 26(6). P. 563–574.
21. Pebody R. G., Leino T., Nohynek H. et al. Pneumococcal vaccination policy in Europe // Euro Surveill. 2005. Vol. 10(9). P. 174–178.
22. Siber G. R., Klugman K. P., Makela P. H. Pneumococcal vaccines the impact of conjugate vaccine. ASM Press, 2008.
23. WHO Weekly Epidemiological Record. 12 January 2007. 2007. № 1/2. P. 93–104.
24. Zhou F., Shefer A., Kong Y., Nuorti J. P. Trends in acute otitis media-related health care utilization by privately insured young children in the United States, 1997–2004 // Pediatrics. 2008. Vol. 121(2). P. 253–260.

ТАТЬЯНА АНАТОЛЬЕВНА ЛОТОШ

старший преподаватель кафедры фармакологии, организации и экономики фармации медицинского факультета, Петрозаводский государственный университет
lotosh@petrsu.ru

ВИКТОРИЯ ДМИТРИЕВНА ЮНАШ

старший преподаватель кафедры фармакологии, организации и экономики фармации медицинского факультета, Петрозаводский государственный университет
yunashvd@psu.karelia.ru

ИРИНА АНАТОЛЬЕВНА ВИНОГРАДОВА

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

ВЛИЯНИЕ ПОСТОЯННОГО ОСВЕЩЕНИЯ НА БИОМАРКЕРЫ СТАРЕНИЯ И ПРОДОЛЖИТЕЛЬНОСТЬ ЖИЗНИ У КРЫС-САМЦОВ

Исследовали влияние постоянного освещения на биомаркеры старения и продолжительность жизни у лабораторных животных. Обнаружено, что содержание крыс в режиме постоянного освещения с одномесячного возраста ведет к ускоренному старению организма и быстрому развитию возрастной патологии. Напротив, содержание крыс в режиме постоянного освещения с 14 месяцев увеличивает среднюю и максимальную продолжительность жизни.

Ключевые слова: световой режим, старение, продолжительность жизни, крысы

В последние годы все большее внимание исследователей привлекает изучение состояния pineальной железы при старении [1]. Установлено, что длительное воздействие света подавляет ночную секрецию мелатонина (МТ) эпифизом. Минимальный подавляющий ночную продукцию МТ эффект зафиксирован для света полного спектра интенсивностью 200–300 лк, максимальный – полное подавление продукции МТ – для света полного спектра интенсивностью более 2000–2500 лк [1]. Воздействие на человека света в ночное время (световое загрязнение) является частью современного образа жизни и рассматривается как один из ведущих экологических факторов [3], [14]. Согласно гипотезе «циркадианной деструкции», воздействие света в ночные часы нарушает эндогенный суточный ритм, подавляет ночную секрецию мелатонина, что приводит к снижению его концентрации в крови [15]. Синтезируемый эпифизом мелатонин участвует в обеспечении многих жизненно важных физиологических процессов: сезонной репродуктивности, стимуляции иммунных процессов, цитостатических эффектах [2], [3], пигментном обмене, метаболизме свободных радикалов [1], регуляции настроения и сна [1], [5]. Считается, что мелатонин имеет отчетливые геропротекторные и антистрессорные свойства [1], [8]. Известно, что уровень мелатонина при старении человека и животных заметно снижается, что приводит к нарушению биологических ритмов, а также возникновению расстройств в деятельности эндокринной, нервной и иммунной систем © Лотош Т. А., Юнаш В. Д., Виноградова И. А., 2011

[1], [2]. Снижение способности эпифиза к выработке мелатонина может способствовать развитию возрастоассоциированных патологических процессов [3], снижению адаптационных возможностей иммунной системы [1], [2], ускорению процесса старения [1] и уменьшению продолжительности жизни [3].

Цель исследования заключается в изучении влияния постоянного освещения на функциональные периоды роста, показатели биологического возраста и возрастную патологию в процессе онтогенеза, продолжительность жизни у крыс.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Исследование проведено на 231 самце крыс собственной разводки. Животные с одномесячного возраста были разделены на 2 группы. Крыс-самцов первой группы ($n = 169$) содержали в условиях стандартного режима освещения (12 ч свет – 12 ч темнота). Люминесцентные лампы (освещенность 750 лк на уровне клеток на 1 м² площади) освещали помещение в течение 12 дневных часов, на ночь (12 ч) свет отключали. Окна в помещении отсутствовали. Свет включали в 7 ч утра и выключали в 7 ч вечера.

Животные второй группы ($n = 62$, LL-1) находились в условиях постоянного освещения люминесцентными лампами 24 ч в сутки (750 лк на 1 м² площади на уровне клеток).

В возрасте 14 месяцев крысы первой группы были разделены на две подгруппы: первую ($n = 69$, LD) оставили в условиях стандартного освеще-

ния, а вторую ($n = 100$, LL-14) перевели в условия постоянного освещения. По данным некоторых авторов [9], именно в этом возрасте у лабораторных животных эпифиз запускает «программу» старения.

Ежемесячно проводили осмотры животных с целью регистрации заболеваний, определяли массу тела, биохимические параметры мочи с помощью тест-полосок «Multistix 10 SG» (фирма «Байер», США). Один раз в месяц одновременно со взвешиванием производили определение количества потребляемого корма из расчета массы съеденного корма в граммах на одну крысу. Для расчета функциональных периодов развития крыс-самцов использовали методы, предложенные И. И. Шмальгаузен (1935) и S. Brody (1945) [6]. Рассчитывали среднюю продолжительность жизни всех и последних 10 % максимально проживших крыс, а также максимальную продолжительность жизни. Полученные в экспериментах результаты подвергали статистической обработке [1]. Анализ данных проводили в среде статистической программы EXCEL общепринятыми методами вариационной статистики. Достоверность результатов оценивали по непараметрическому U-критерию Уилксона – Манна – Уитни и методом χ^2 .

Работа выполнена с соблюдением принципов Хельсинкской декларации о гуманном отношении к животным, принципов гуманности, изложенных в директиве Европейского сообщества (86/609/ЕС), «Правил проведения работ с использованием экспериментальных животных», «Биоэтических правил проведения исследований на человеке и животных».

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Как можно судить по данным, представленным в табл. 1, масса тела крыс-самцов в процессе онтогенеза увеличивалась во всех световых режимах. В LD-режиме самцы в 6 месяцев весили достоверно больше по сравнению с аналогичным параметром в предыдущем месяце. Самцы, содержащиеся в режиме LL-1, весили достоверно больше по сравнению с предыдущим месяцем в возрасте 6 и 12 месяцев, что соответствует фазе прогрессивного роста, когда преобладают процессы ассимиляции и происходит быстрое увеличение массы тела.

На протяжении всего исследования во всех группах не наблюдалось достоверных различий по массе тела, за исключением возраста 18 месяцев, когда самцы группы LL-14 весили достоверно больше контрольных особей.

Самцы, содержащиеся в режиме LD, имели максимальный вес в возрасте 15 месяцев, что соответствует завершению периода «второй зрелости», который характеризуется окончанием роста животного по весу [6]. Крысы, находящиеся в режиме LL-1, имели наибольший вес в 12 ме-

сяцев. В дальнейшем средний вес этой группы не увеличивался. В обычных условиях животные достигают 97,8 % от веса взрослых животных и продолжают расти до 20 месяцев [6]. Максимальное значение веса у крыс в режиме LL-14 наблюдалось в возрасте 18 месяцев, что говорит о более длительной фазе стабильного роста у данной группы крыс.

Таблица 1

Возрастная динамика веса тела крыс-самцов в различных световых режимах

Возраст крыс (мес.)	Вес (г)		
	LD	LL-1	LL-14
3	273,0 ± 27,47	286,0 ± 16,81	
6	357,7 ± 20,08 ^a	357,8 ± 26,78 ^a	
9	373,4 ± 38,21	390,3 ± 29,49	
12	417,3 ± 30,58	438,8 ± 33,89 ^a	
	LD	LL-14	LL-1
15	438,6 ± 33,12	466,4 ± 31,08	425,7 ± 33,36
18	414,2 ± 27,42	476 ± 26,87*	428,0 ± 21,13
21	395,8 ± 31,2	429,80 ± 32,36	412,5 ± 37,34
24	400,5 ± 34,61	414,10 ± 48,43	398,8 ± 31,99

Примечание. * – $p < 0,05$ по сравнению с LD-режимом в том же месяце; ^a – $p < 0,05$ по сравнению с предыдущим значением (критерий Уилксона – Манна – Уитни).

Вес тела у самцов в 15 месяцев в условиях LD был на 60,6 % больше, чем у таковых в 3 месяца. Наименьший прирост по массе наблюдался в режиме LL-1: самцы в 15 месяцев весили на 48,8 % больше 3-месячных. Наибольший прирост массы имели крысы, находящиеся в режиме LL-14: самцы в 15 месяцев весили на 70,7 % больше, чем в возрасте 3 месяца.

Самцы, находящиеся в режиме LL-1, уже в возрасте 3 месяцев весили несколько больше, чем крысы в режиме LD, а прирост массы тела в этой группе был наименьшим, что согласуется с работами Д. В. Клочкова и Д. К. Беляева (1977) [1]. Эти результаты также подтверждают возможность существования положительной корреляции между возрастным уровнем разности веса и продолжительностью жизни [10].

Данные литературы о влиянии гипо- или гиперфункции эпифиза на рост животных несколько противоречивы. Так, одни авторы после эпифизэктомии у крыс наблюдали ускорение прироста веса тела по сравнению с ложнопериоперированными животными, другие не наблюдали подобного эффекта [4]. По всей видимости, при проведении данных экспериментов не учитывался возраст животных, который, как показывают наши исследования, имеет довольно большое значение.

Регулярные измерения потребления корма выявили достоверное повышение потребления самцами, находящимися в режиме LL-1, в 18 и 21 месяц, по сравнению с аналогичным параметром у крыс в стандартном режиме освещения. В 24-месячном возрасте отмечали достоверное

уменьшение потребления корма в режиме LL-1 и LD по сравнению с предыдущим месяцем. У животных, содержащихся в режиме LL-14, наблюдали достоверное увеличение потребления корма в 18 и 24 месяца по сравнению с режимом LD. Таким образом, влияние постоянного освещения в режимах LL-1 и LL-14 на количество потребляемого корма проявлялось у самцов в возрасте 18, 21 и 24 месяцев в виде повышенного потребления корма по сравнению со стандартным режимом. Полученные данные не согласуются с исследованиями, проведенными на мышах различных линий в стандартном и постоянном режимах освещения, поскольку у мышей с увеличением интенсивности освещения происходило снижение аппетита и потребления корма [7].

Таблица 2

Возрастная динамика потребления корма самцами крыс в различных световых режимах

Возраст крыс (мес.)	Потребление корма (г/крыса/день)		
	LD	LL-1	
3	21,8 ± 4,2	23,3 ± 2,7	
6	24,3 ± 3,2	27,3 ± 5,7	
9	35,3 ± 6,7	30,8 ± 3,5	
12	30,6 ± 5,6	30,9 ± 2,6	
	LD	LL-14	LL-1
15	26,3 ± 4,8	25,3 ± 3,2	26,6 ± 7,1
18	22,1 ± 3,6	32,0 ± 3,0*	28,9 ± 3,5*
21	25,6 ± 2,8	26,5 ± 2,3	36,7 ± 4,2*
24	16,6 ± 6,2 ^a	28,3 ± 2,4*	20,7 ± 6,2 ^a

Примечание. * – $p < 0,05$ по сравнению с LD-режимом в том же месяце; ^a – $p < 0,05$ по сравнению с предыдущим значением (критерий Уилксона – Манна – Уитни).

Анализ изменений роста-весовых параметров позволил определить границы естественных периодов постнатальной жизни и время наступления старения организма. В основу периодизации постнатальной жизни белых крыс была положена схема возрастных периодов жизни человека; отдельные периоды выделены на основе использования некоторых показателей роста. Выделяют фазу прогрессивного роста, когда животные достигают 86 % веса взрослых особей, фазу стабильного и регрессивного роста. Разделение фазы регрессивного роста на отдельные периоды может быть произведено по темпам потери веса, по кривым смертности и проценту доживания животных до определенного возраста [6].

Полученные в нашей работе данные свидетельствуют, что границы этих периодов у лабораторных животных отличались в зависимости от режимов освещения (рис. 1). Начало предстарческого периода фазы регрессивного роста у крыс-самцов в стандартном режиме освещения зарегистрировано в 15 месяцев, продолжительность предстарческого периода составила 8 месяцев. Старческий период жизни крыс-самцов на-

чинался в 23 месяца. Сравнивая полученные данные с аналогичными параметрами у крыс, находящихся в режимах LL-1 и LL-14, установлено, что в режиме LL-1 начало фазы регрессивного роста зафиксировано раньше – в 13 месяцев, продолжительность предстарческого периода составила 9 месяцев, старческий период наступил в 22 месяца. Конец фазы стабильного роста у крыс, находящихся в условиях LL-14, зафиксирован в 15 месяцев, продолжительность предстарческого периода равнялась 10 месяцам, старческий период начинался в 25 месяцев. Таким образом, воздействие постоянного освещения с одномесечного возраста приводило к сокращению фазы прогрессивного роста и раннему завершению фазы стабильного роста, укорочению предстарческого периода фазы регрессивного роста, то есть к более раннему старению. Воздействие постоянного освещения с 14-месячного возраста удлиняло предстарческий период фазы регрессивного роста на 2 месяца, то есть замедляло наступление старческого периода.

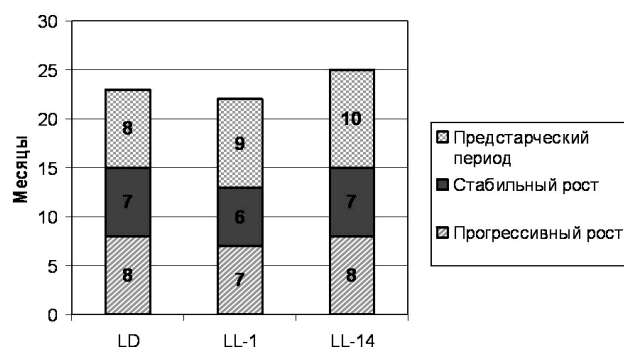


Рис. 1. Влияние различных световых режимов на функциональные периоды роста самцов крыс: LL-14 – постоянное освещение с 14 месяцев; LL-1 – постоянное освещение с 1 месяца; LD – стандартное освещение

Заболевания воспалительной этиологии регистрировались достоверно чаще в группе крыс, содержащихся в постоянном освещении с одномесечного возраста, чем у содержащихся в условиях нормального чередования света и темноты или при воздействии постоянного освещения с 14 месяцев (табл. 3). Если у самцов в режиме LD в 18-месячном возрасте риниты были зарегистрированы в 42,6 % случаев, у особей в группе LL-14 – в 20 %, то у крыс, содержащихся в режиме LL-1, – в 79,2 % случаев. Пневмонии в 18-месячном возрасте встречались с одинаковой частотой у животных, находящихся в режимах LD и LL-14, и составили 15 и 16 % соответственно, тогда как у 33,3 % особей, находящихся в группе LL-1, диагностировались пневмонии. Также у крыс в режиме LL-1 чаще обнаруживались конъюнктивиты (4,2 %) и отиты (3 %). В условиях постоянного освещения у крыс вне зависимости от начала времени воздействия диагностировались инфекции ЖКТ, которые не

встречались у самцов в группе LD. Полученные данные свидетельствуют, что у крыс-самцов, находящихся в условиях постоянного освещения с 14 месяцев, такие заболевания, как конъюнктивиты, риниты и пневмонии, регистрировались реже или не превышали таковых показателей у крыс, находящихся в условиях нормального чередования света и темноты.

Таблица 3

Возрастная динамика заболеваний, обнаруженных у самцов крыс в различных режимах освещения

Возраст крыс (мес.)	Режим освещения	Конъюнктивиты, кератиты	Пневмонии	Риниты	Отиты	Инфекции ЖКТ
15	LD	2,6 %	5,3 %	1,8 %	1,8 %	0
	LL-1	4 %	16 %*	52 %**	1,8 %	0
	LL-14	0	6,86 %	5,8 %*	0,9 %	3,9 %
18	LD	11,1 %	15 %	42,6 %	1,8 %	0
	LL-1	4,2 %	33,3 %*	79,2 %**	2 %	5,6 %*
	LL-14	4 %	16 %	20 %**	3 %	19 %**
21	LD	12 %	20,6 %	57,4 %	2,1 %	0
	LL-1	16,6 %	50 %**	72,2 %**	2,5 %	12,5 %**
	LL-14	3,5 %	18,6 %	38,4 %**	3,5 %	2,3 %
24	LD	16,7 %	13,3 %	46,8 %	2,1 %	0
	LL-1	18,4 %	38,5 %**	61,5 %**	2,5 %	15,4 %**
	LL-14	4,4 %	23,94 %**	38 %	2,8 %	4,2 %*

Примечание. Значения даны в % по отношению к общему количеству особей. LL-14 – постоянное освещение с 14 месяцев; LL-1 – постоянное освещение с 1 месяца; LD – стандартное освещение. Различия статистически достоверны по сравнению с LD-режимом в том же месяце: * – $p < 0,05$; ** – $p < 0,01$ (метод χ^2).

Ежемесячный анализ мочи крыс-самцов показал, что до 15-месячного возраста глюкоза в моче не обнаруживалась во всех исследуемых группах. В дальнейшем у 20 % крыс в режиме LL-1 в возрасте 15 месяцев было зарегистрировано появление глюкозы. В 21-месячном возрасте глюкозурию регистрировали уже у 45 % крыс, в то время как в других группах в этом возрасте сахар в моче не определялся. В возрасте 24 месяцев впервые наблюдалось появление глюкозы в группе LD у 40 % крыс и увеличение количества крыс с глюкозурией до 50 % в режиме LL-1. В группе LL-14 глюкозурия не регистрировалась ни в одном из возрастных периодов. Повышенное содержание лейкоцитов в моче отмечали в 21-месячном возрасте у всех крыс, но в группе LD у 60 % самцов диагностировали лейкоцитурию, а в группах LL-1 и LL-14 – у 100 и 85 % крыс соответственно. В возрасте 24 месяцев лейкоцитурия в группах LD и LL-14 наблюдалась в 90 % всех случаев, тогда как в режиме LL-1 составила 100 %. Эритроциты впервые были зарегистрированы у крыс группы LL-1 уже в одномесечном возрасте, у крыс групп LD и LL-14 – в возрасте 8 месяцев. Гематурия в возрасте 21 месяца обнаруживалась у 60 % крыс контрольной группы, у 80 и 85 % крыс, находящихся в группах LL-14 и LL-1. Повышенное содержание билирубина наблюдалось в анализах мочи во всех исследуемых

группах с трехмесячного возраста: у 70 % крыс группы LD и у 80 % крыс группы LL-1.

Максимальное потребление воды у крыс групп LD и LL-14 приходилось на 15 месяцев, что косвенно указывает на функциональный рост животных до данного возраста. У крыс в режиме LL-1 максимальное потребление воды приходилось на 12 месяцев, в дальнейшем происходило снижение этого показателя. Особи, находящиеся в режиме LD, потребляли воду на одном уровне в течение 15–18 месяцев, затем с 21-месячного возраста наблюдалось возрастное снижение потребления жидкости. У самцов группы LL-14 показатели потребления воды оказались стабильными на протяжении 15–24 месяцев, и тенденции к уменьшению потребления жидкости в этот возрастной период не наблюдалось. Таким образом, возраст максимального потребления воды крысами-самцами соответствует определенным по массе тела возрастным периодам. Максимальное потребление жидкости в режиме LL-1 приходилось на 12 месяцев, в дальнейшем наблюдалось уменьшение потребления, что соответствует началу предстарческого периода, который зарегистрирован по весу у крыс данной группы в 13 месяцев. Аналогичные данные получены для крыс в режиме LD и LL-14, где предстарческий период начинался с возраста 15 месяцев (табл. 4).

Таблица 4

Возрастная динамика потребления воды самцами крыс в различных световых режимах

Возраст крыс (мес.)	Потребление воды (мл)		
	LD	LL-1	
1	22,0 ± 3,01	13,7 ± 1,98*	
3	25,2 ± 3,52	28,6 ± 3,49 ^a	
6	23,9 ± 1,46	16,1 ± 3,98*	
9	31,5 ± 4,30 ^a	31,1 ± 3,33 ^a	
12	36,0 ± 4,15 ^a	45,9 ± 3,15 ^a	
	LD	LL-14	LL-1
15	39,1 ± 2,21 ^a	39,15 ± 1,76 ^a	34,0 ± 4,76 ^a
18	38,5 ± 5,56 ^a	38,0 ± 4,36 ^a	31,9 ± 1,99 ^a
21	30,3 ± 2,25 ^a	37,75 ± 1,23 ^{a*}	27,2 ± 2,81 ^a
24	27,5 ± 2,81	38,4 ± 2,57 ^{a*}	21,9 ± 0,83 ^{a*}

Примечание. * – $p < 0,05$ – по сравнению с LD-режимом в том же месяце; ^a – $p < 0,05$ – по сравнению с показателем, полученным в одномесечном возрасте (критерий Уилксона – Манна – Уитни).

Особи, находящиеся в режиме LD, имели максимальный диурез в 15-месячном возрасте, причем диурез сохранялся на одном уровне до 18 месяцев, затем наблюдалось его возрастное снижение. У крыс в режиме LL-1 максимальный диурез приходился также на 15 месяцев, однако показатель, регистрируемый в данном режиме, был достоверно ниже показателя диуреза крыс, находящихся в режиме LD. В дальнейшем наблюдалось снижение суточного диуреза у крыс группы LL-1. Наибольшие показатели диуреза у крыс группы LL-14 приходились на 24 месяца (табл. 5).

Таблица 5

Динамика суточного диуреза у самцов крыс в различных световых режимах

Возраст крыс (мес.)	Суточный диурез (мл)	
	LD	LL-1
1	10,8 ± 0,57	6,0 ± 1,4*
3	12,2 ± 1,58	10,1 ± 1,32
6	10,3 ± 2,12	9,0 ± 2,34
9	10,8 ± 1,25	8,0 ± 0,83
12	12,4 ± 2,6	8,2 ± 1,51
	LD	LL-14
15	17,8 ± 2,1	15,3 ± 1,24
18	12,4 ± 1,72	12,6 ± 2,47
21	12,6 ± 1,7	15,24 ± 1,43
24	8,7 ± 1,46	17,3 ± 1,82*
		LL-1
		11,5 ± 1,73* ^a
		10,8 ± 2,79
		10,1 ± 2,29
		5,0 ± 2,16

Примечание. * – $p < 0,05$ – по сравнению с LD-режимом в том же месяце; ^a – $p < 0,05$ – по сравнению с показателем, полученным в одномесячном возрасте (критерий Уилксона – Манна – Уитни).

Таким образом, максимальный диурез у самцов крыс в различных световых режимах приходился на разные возрастные периоды: в режимах LD и LL-1 – на 15 месяцев, а в режиме LL-14 – на 24 месяца. Между потреблением воды и суточным диурезом у крыс-самцов группы LD определялась некоторая согласованность значений. Максимальные диурез и потребление воды в режиме LD наблюдались в 15 месяцев, окончание фазы стабильного роста также приходилось на 15 месяцев. Особи в режиме LL-1 имели наибольший диурез в 15-месячном возрасте, максимальное потребление воды – в 12 месяцев, а начало фазы регрессивного роста наблюдали в 13 месяцев, что свидетельствует о несовпадении константы объемного роста крыс с функциональными показателями в этом режиме. Более низкие показатели диуреза у самцов в режиме LL-1 на протяжении всего исследования по сравнению с особями в режиме LD указывают на более раннее возникновение нарушений водно-солевого обмена и функции почек. Патологические отклонения в биохимических параметрах мочи у крыс-самцов, находящихся в данном режиме освещения, также обнаруживались гораздо раньше, причем они были более выражены по сравнению с аналогичными показателями у самцов в стандартном режиме освещения. Влияние постоянного освещения с 14 месяцев оказывало более благоприятное воздействие на водно-солевой обмен и биохимические показатели мочи. У самцов данной группы патологические отклонения в анализах мочи были менее выражены и регистрировались позже, чем в режимах LL-1 и LD.

Ранее было установлено, что эпифизэктомия крыс в молодом возрасте приводит к существенному уменьшению продолжительности жизни [2], [9]. Некоторые исследователи [13], [14] показали, что пересадка эпифиза старых мышей молодым является причиной ускоренного старения

последних [12]. И напротив, после трансплантации эпифизэктомизированным старым крысам шишковидной железы от молодых доноров наблюдалось увеличение продолжительности жизни старых крыс [2]. Влияние постоянного освещения в молодом возрасте, так же как и эпифизэктомия, существенно укорачивает продолжительность жизни лабораторных животных. Как можно судить по данным настоящего исследования, представленным в табл. 6, содержание самцов-крыс в условиях постоянного освещения с одномесячного возраста сопровождалось уменьшением средней продолжительности жизни на 3 % и максимальной продолжительности жизни на 4 % по сравнению с группой крыс, содержавшихся при стандартном режиме освещения. Напротив, содержание крыс при постоянном освещении с 14 месяцев сопровождалось увеличением средней продолжительности жизни на 6,7 % и максимальной продолжительности жизни на 14,6 % по сравнению с группой крыс, содержавшихся в режиме LD. Средняя продолжительность жизни последних 10 % крыс сокращалась при содержании в условиях LL-1. Напротив, содержание крыс в режиме LL-14 сопровождалось существенным увеличением средней продолжительности жизни последних 10 % крыс на 9,4 % по сравнению с аналогичным показателем в режиме LD.

Таблица 6

Влияние различных режимов освещения на продолжительность жизни самцов крыс

Показатель	Световой режим		
	LD	LL-1	LL-14
СПЖ, сут.	766 ± 25,3	744 ± 28,0	818 ± 18,0
МПЖ, сут.	1045	1005	1198
СПЖ последних 10 % крыс, сут.	994 ± 9,2	1002 ± 1,8	1087 ± 8,3**

Примечание. СПЖ – средняя продолжительность жизни; МПЖ – максимальная продолжительность жизни. ** – $p < 0,01$ по сравнению со значениями, полученными в режиме LD (критерий Уилксона – Манна – Уитни).

На рис. 2 можно видеть, что кривая выживаемости для крыс-самцов группы LL-1 существенно смещена влево по отношению к кривой выживаемости крыс группы LD. Кривая выживаемости для самцов группы LL-14 начиная с 31 месяца смещена вправо по отношению к кривой выживаемости для крыс группы LD, что свидетельствует о более благоприятном воздействии на продолжительность жизни крыс постоянного освещения с 14 месяцев, чем постоянного освещения с одномесячного возраста.

Таким образом, крысы, содержавшиеся при постоянном освещении с одномесячного возраста, имели наиболее низкие показатели продолжительности жизни по сравнению с животными, находившимися в стандартном режиме освещения.

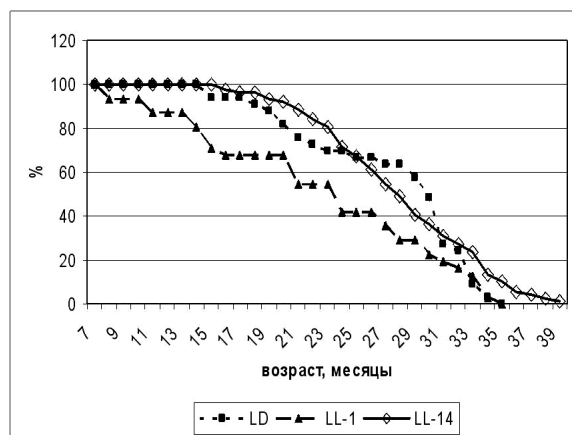


Рис. 2. Влияние светового режима на кривые выживаемости самцов крыс: LL-14 — постоянное освещение с 14 месяцев; LL-1 — постоянное освещение с 1 месяца; LD — стандартное освещение

Полученные данные свидетельствуют о неблагоприятном влиянии постоянного освещения в молодом возрасте на продолжительность жизни крыс, что согласуется с результатами ряда исследований [3]. Напротив, установлено, что у крыс, содержащихся при постоянном освещении с 14 месяцев, средняя продолжительность жизни на 10 % достоверно выше, чем аналогичный показатель у животных в режимах стандартного и постоянного освещения с однемесячного возраста. Эти данные согласуются с исследованиями У. Пьерпаоли и его коллег [11], которые установили, что эпифизэктомия у мышей в возрасте 14 месяцев ведет к удлинению продолжи-

тельности жизни мышей и поддержанию их гормонального и метаболического статуса на уровне 5-месячных животных. Воздействие постоянного освещения на крыс с 14 месяцев, как пинеалэктомия [11] в этом возрасте у мышей, оказывает сходное благоприятное влияние на продолжительность жизни животных.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Влияние постоянного освещения на физиологические процессы организма описано во многих работах [3]. Показано, что избыточный свет приводит к ускоренному старению пинеальной железы и угнетению выработки мелатонина [1]. В нашем исследовании воздействие постоянного освещения с однемесячного возраста приводило к более раннему старению организма и возникновению возрастной патологии, сокращению средней и максимальной продолжительности жизни по сравнению с животными, содержащимися в условиях нормального чередования света и темноты. Напротив, воздействие постоянного освещения с 14-месячного возраста замедляло наступление старческого периода, увеличивало среднюю и максимальную продолжительность жизни крыс по сравнению с аналогичными показателями животных, находившихся в стандартном режиме, а также в постоянном режиме освещения с однемесячного возраста. Ассоциированная с возрастом патология наблюдалась в данном режиме реже, чем в группе LL-1, и не превышала таковую в стандартном режиме освещения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Анисимов В. Н., Виноградова И. А. Световой режим, мелатонин и риск рака // Вопросы онкологии. 2006. Т. 52. № 5. С. 491–498.
2. Арушанян Э. Б. Гормон эпифиза мелатонин и его лечебные возможности // Российский медицинский журнал. 2005. Т. 13. № 26. С. 1755–1760.
3. Виноградова И. А., Букалев А. В., Забежинский М. А., Семенченко А. В. 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.
4. Грачев И. И., Усанова Р. И., Селиверстов Ю. А. Влияние эпифиза на соматотропную функцию гипофиза // Физиологический журнал СССР им. И. М. Сеченова. 1972. Т. 58. № 2. С. 272–275.
5. Комаров Ф. И., Рапопорт С. И., Малиновская Н. К. Суточные ритмы в клинике внутренних болезней // Клиническая медицина. 2005. № 8. С. 8–12.
6. Махинько В. И., Никитин В. Н. Константы роста и функциональные периоды развития в постнатальной жизни белых крыс // Эволюция темпов индивидуального развития животных. М.: Наука, 1977. С. 249–265.
7. 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.
8. Anisimov V. N., Popovich I. G., Zabezhinski M. A., Anisimov S. V. et al. Melatonin as antioxidant, geroprotector and anticarcinogen // Biochimica and Biophysica Acta. 2006. Vol. 1757. P. 573–589.
9. Malm O. J., Skaug O. E., Lingjaerde P. The effect of pinealectomy on bodily growth, survival rate and P³² uptake in the rat // Acta Endocr. 1959. Vol. 30. № 1. P. 22–28.
10. Miller R. A., Harper J. M., Galecki A., Burke D. T. Big mice die young: early life body weight predicts longevity in genetically heterogeneous mice // Aging Cell. 2002. Vol. 1. № 1. P. 22–29.
11. Pierpaoli W., Bulian D. The pineal aging and death program. I. Grafting of old pineals in young mice accelerates their aging // J. Anti-Aging. Med. 2001. Vol. 4. № 1. P. 31–37.
12. Pierpaoli W., Bulian D. The pineal Aging and Death Program. Life Prolongation in Pre-aging Pinealectomized Mice // Ann. N. Y. Acad. Sci. 2005. Vol. 1057. P. 133–144.
13. Pierpaoli W., Lesnikov V. A. The pineal aging clock. Evidence, models, mechanisms, interventions // Ann. N. Y. Acad. Sci. 1994. Vol. 719. P. 461–473.
14. Pierpaoli W., Regelson W. The pineal control of aging. The effect of melatonin and pineal grafting on aging mice // Proc. Natl. Acad. Sci. USA. 1994. Vol. 91. P. 787–791.
15. Stevens R. G. Circadian disruption and breast cancer. From melatonin to clock genes // Epidemiology. 2005. Vol. 16. P. 501–507.

ИНГА ГЕННАДЬЕВНА ПАШКОВА

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

СРАВНИТЕЛЬНАЯ ОЦЕНКА АНТРОПОМЕТРИЧЕСКИХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ И КОМПОНЕНТНОГО СОСТАВА ТЕЛА ЛИЦ ЮНОШЕСКОГО ВОЗРАСТА В РЕСПУБЛИКЕ КАРЕЛИИ

Проведено антропометрическое обследование и компонентный анализ тела 508 студентов Петрозаводского государственного университета (153 юноши и 355 девушек). Полученные данные показывают тенденцию роста числа молодых людей с избыточным весом тела за счет повышенной массы жирового компонента, что говорит о формировании фенотипа, адаптированного к условиям проживания в северном регионе. Результаты исследования составят основу формируемой региональной базы данных.

Ключевые слова: физическое развитие, юношеский возраст, антропометрия, жировая, костная, мышечная масса

В молодом возрасте заканчивается развитие большей части антропометрических показателей и окончательно формируется соматотип человека [10]. Данный период онтогенеза считается наиболее значимым в изучении конкретных морфологических критериев диагностики нормы и патологии [11] как время социально-физического становления в профессии и первичной профилактики прогнозируемой патологии [9], [14], [17]. Данные морфофункционального статуса являются одним из основных и информативных показателей не только индивидуального развития растущего организма, но и состояния здоровья подрастающего поколения, формирование которого в значительной степени обусловлено эколого-климатическими и социально-экономическими факторами [2]. Приспособление организма к различным факторам окружающей среды является длительным историческим процессом, направленным на формирование экологического типа, обеспечивающего оптимальные условия для его жизнедеятельности. Действие факторов внешней среды на организм человека отмечено в различии антропометрических параметров населения разных климатогеографических районов [12]. В связи с этим разработка и изучение индивидуально-типологических особенностей становится одной из основных задач профилактической медицины. Неблагоприятные природно-социальные факторы северного региона влияют на скорость ростовых процессов и увеличивают число лиц с дисгармоничным физическим развитием и функциональными отклонениями [2]. Отсутствие информации об уровне физического развития, антропометрических характеристиках и компонентном составе тела юношей и девушек, проживающих на территории Республики Карелии, ограничивает возможность проведения сравнительного анализа с представителями других регионов РФ.

© Пашкова И. Г., 2011

Цель работы – определить индивидуальную изменчивость, половые различия значений антропометрических показателей и степень выраженности анатомических компонентов, определяющих соматотипологическую характеристику молодых людей, проживающих в Республике Карелии.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Объектом исследования стали 508 студентов Петрозаводского государственного университета (ПетрГУ) – 355 девушек (16–20 лет) и 153 юноши (17–21 года), проживающие на территории Республики Карелии. Все исследования проводились с информированного согласия студентов в 2005–2010 годах. При выделении возрастных групп использовалась «Схема возрастной периодизации онтогенеза человека», принятая на VII Всесоюзной конференции по проблемам возрастной морфологии, физиологии и биохимии АПН СССР (Москва, 1965). Средний возраст обследованных составил $18,5 \pm 0,1$ года в обеих половых группах. По климатозоологическим условиям Республика Карелия входит в состав Баренцева Евро-Арктического региона России, где установлено воздействие на организм особенно неблагоприятных метеорологических условий в виде повышенной геомагнитной активности, низких температур, а также светового режима [13]. Таким образом, организм человека подвергается воздействию комплекса неблагоприятных климатогеографических факторов, оказывающих негативное влияние на качество жизни и уровень здоровья [3], [13]. Многочисленные исследования показывают, что проживание человека в гипокомфортных климатогеографических условиях в сочетании с антропогенной нагрузкой приводит к более интенсивному использованию и истощению адаптационных резервов организма человека.

Антропометрическое обследование проводили по методическим рекомендациям Э. Г. Мартиросова (1982) [7] и В. Г. Николаева (2001) [11]. Программа исследования включала измерение следующих показателей: массы тела, длины тела, 8 обхватных размеров, 4 диаметров эпифизов конечностей, толщины 7 кожно-жировых складок. Использовали стандартный антропометрический инструментарий: медицинские весы, металлический штанговый антропометр Мартина, скользящий циркуль, калипер-циркуль, пластиковую мерную ленту. Разделение массы тела производили на жировой, мышечный и костный компоненты по формулам J. Matiegka (1921) [18]. Массо-ростовые отношения оценивались посредством использования индекса массы тела (ИМТ, или индекс Кетле, $\text{кг}/\text{м}^2$), индекса Рорера (индекс плотности тела, $\text{кг}/\text{см}^3$). Для определения площади поверхности тела как одного из важных признаков физического развития [8] применялась формула Иссаксона (1958), рекомендованная для лиц, у которых сумма веса и длины тела больше 160 единиц.

Для оптимальной оценки физического развития проведен центильный анализ. Центильные шкалы представляют собой описание частотных долей распределения диапазона варьирования признаков, абсолютно независимое от математического распределения. Использовалась шкала, в которой предусмотрено выделение границ 3, 10, 25, 50, 75, 90 центилей распределения. При этом за норму принимали значения, свойственные половине молодых людей в интервалах 25–50–75 центилей.

Все результаты антропометрического обследования обработаны вариационно-статистическими методами. Для проверки нормальности распределения был использован критерий Шапиро – Уилкса. Для наглядного представления и анализа результатов измерения были рассчитаны значения таких показателей, как среднее арифметическое, стандартная ошибка средней. При описании результатов исследования использовалось следующее представление: «среднее значение (M) $\pm$ стандартная ошибка среднего (m)». Для определения достоверности различий характеристик исследуемых независимых выборок с нормальным распределением использовались параметрический критерий Фишера и t-критерий Стьюдента. В случае распределения, отличного от нормального, применялся непараметрический критерий Манна – Уитни. Различия значений исследуемых параметров считали достоверными при 99 и 95 % порогах вероятности ($P < 0,01$ и $P < 0,05$ соответственно). Статистическая обработка материала осуществлялась с использованием программных продуктов «Statistica 6.0 for Windows» и «Microsoft Excel».

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Согласно возрастной периодизации постнатального развития человека, возраст 16–20 лет у девушек и 17–21 год у юношей соответствует юношескому периоду онтогенеза. Для этого периода характерно протекание финальных стадий ростовых процессов, заключающихся в завершении роста скелета, формировании близкого к дефинитивному уровня развития мышечной системы, величины и топографии подкожного жиросотложения.

Результаты центильной оценки физического развития юношей (табл. 1) показали, что 50 % всех значений длины тела входили в интервал от 178 до 182 см (от P_{25} до P_{75}), что соответствует распространенным нормативным показателям. Центильные шкалы массы тела были в пределах 71,0–78,4 кг, количество жира – в пределах 14,0–19,9 кг, мышечная масса – 38,2–42,9 кг, костная масса – 11,9–13,0 кг.

Таблица 1

Центильные шкалы габаритных размеров и компонентов тела юношей

Показатели	Центильная оценка						
	P_3	P_{10}	P_{25}	P_{50}	P_{75}	P_{90}	P_{97}
	Очень низкая 3 %	Низкая 7 %	Ниже средней 15 %	Средняя 50 %	Выше средней 15 %	Высокая 7 %	Очень высокая 3 %
Длина тела, см	165	168	172	178	183	187	193
Масса тела, кг	55,0	60,0	64,0	71,0	78,5	87,0	100,0
Жировая масса, кг	5,6	6,8	10,0	14,0	20,0	26,0	30,0
Мышечная масса, кг	27,4	29,7	32,9	38,2	43,0	48,6	54,8
Костная масса, кг	8,9	9,8	10,6	11,9	13,1	14,3	14,9

Таблица 2

Центильные величины габаритных и компонентных показателей девушек

Показатели	Центильная оценка						
	P_3	P_{10}	P_{25}	P_{50}	P_{75}	P_{90}	P_{97}
	Очень низкая 3 %	Низкая 7 %	Ниже средней 15 %	Средняя 50 %	Выше средней 15 %	Высокая 7 %	Очень высокая 3 %
Длина тела, см	154	157	161	165	168	172	176
Масса тела, кг	45	49	53	57	63	68	77
Жировая масса, кг	5,6	8,0	11,5	16,1	20,0	24,1	28,6
Мышечная масса, кг	21,9	24,6	27,8	30,9	33,9	37,7	42,1
Костная масса, кг	6,4	7,1	7,7	8,5	9,4	10,3	11,2

Центильная оценка значений основных антропометрических показателей обследованных

девушек (табл. 2) выявила, что в 50 % случаев значения длины тела находились в интервале от 165 до 167 см, вес тела – от 57 до 62 кг, количество жира – в пределах 16,1–19,9 кг, мышечная масса – 30,9–33,8 кг, костная масса – 8,5–9,3 кг.

Сравнительный анализ значений антропометрических параметров выявил статистически значимые различия значений показателей массы и длины тела у девушек и юношей (табл. 3). Средние значения показателей длины и массы тела юношей превышают средние значения данных показателей девушек на 7,6 и 19,6 % соответственно. В исследовании было выявлено, что масса и длина тела современных юношей, проживающих в Карелии, в сравнении с данными сверстников 80-х годов прошлого столетия [15], имеет четкую тенденцию к увеличению. У девушек произошло увеличение длины тела, а значения массы тела снизились.

Таблица 3

Антропометрические значения показателей компонентного состава тела

Антропометрические показатели	Юноши, $M \pm m$, $n = 153$	Девушки, $M \pm m$, $n = 355$	P
Длина тела, см	$178,87 \pm 0,68$	$164,69 \pm 0,35$	$P = 0,0000$
Масса тела, кг	$72,30 \pm 0,85$	$58,44 \pm 0,55$	$P = 0,0000$
Индекс Кетле, кг/м ²	$22,55 \pm 0,25$	$21,49 \pm 0,16$	$P = 0,0005$
Индекс Рорера, кг/см ³	$1,26 \pm 0,02$	$1,31 \pm 0,01$	$P = 0,021$
Площадь поверхности тела, м ²	$1,88 \pm 0,02$	$1,61 \pm 0,01$	$P = 0,0000$
Масса жирового компонента, кг	$16,43 \pm 0,63$	$16,47 \pm 0,41$	$P = 0,95$
Относительная масса жирового компонента, %	$22,21 \pm 0,84$	$27,75 \pm 0,54$	$P = 0,0000$
Масса мышечного компонента, кг	$38,62 \pm 0,56$	$31,02 \pm 0,36$	$P = 0,000$
Относительная масса мышечного компонента, %	$53,38 \pm 0,51$	$53,11 \pm 0,33$	$P = 0,66$
Масса костного компонента, кг	$11,81 \pm 0,23$	$8,69 \pm 0,15$	$P = 0,0000$
Относительная масса костного компонента, %	$16,48 \pm 0,43$	$14,99 \pm 0,28$	$P = 0,0039$

При сравнении значений антропометрических показателей молодых людей из разных регионов РФ было выявлено, что значения показателя длины тела проявляют стабильность вне зависимости от региона проживания. Значения массы тела юношей в Карелии не отличаются от значений данного показателя представителей Северо-Востока России [6], находятся ниже таковых значений в популяции юношей Краснодарского края [5], но превышают значения массы тела юношей Москвы [9], Красноярска [4] и Пензы [1]. Длина тела карельских девушек сходна с данными в популяции девушек Красноярска и Северо-Востока (г. Сургут), больше длины тела пензенских девушек; но более высокими оказались представи-

тельницы Краснодарского края и Москвы. Значения массы тела девушек Карелии превышают значения данного показателя в популяции девушек Пензы и Москвы, но меньше, чем у девушек Красноярска и Краснодарского края.

Многие ведущие клиницисты интенсивно используют ИМТ для оценки ожирения и избыточной массы тела, что является актуальной проблемой современной медицины. Большинство юношей (74 %) и девушек (80 %) имели величину ИМТ, соответствующую нормальной массе тела; дефицит массы тела выявлен у 4 % юношей и 12 % девушек. Излишнюю массу тела имеют 19 % юношей и 7 % девушек, а у 3 % юношей и 1 % девушек выявлено ожирение (рис. 1).

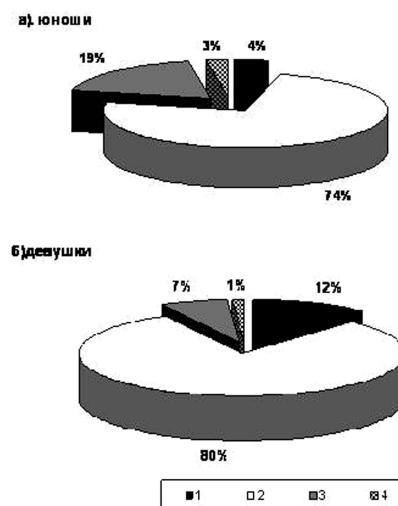


Рис. 1. Распределение юношей (а) и девушек (б) по величине ИМТ (индекса Кетле):

1 – хроническая энергетическая недостаточность;
2 – нормальный вес тела; 3 – лишний вес; 4 – ожирение

Среднее значение индекса Рорера у юношей составило $1,27 \pm 0,02$ кг/см³, у девушек – $1,30 \pm 0,02$ кг/см³. Согласно значениям этого индекса, плотность ниже средней имели 28 % юношей и 17 % девушек, среднюю – 32 и 41 %, выше средней – 40 и 42 % соответственно. Площадь поверхности тела юношей составила $1,88 \pm 0,02$ м², в то время как у девушек значение данного показателя оказалось на уровне $1,61 \pm 0,01$ м², что говорит о статистически значимых различиях значений данного показателя между группами (табл. 3).

Поскольку жировая ткань является наиболее лабильным соматическим компонентом, который быстро реагирует на воздействие различных факторов, была проведена оценка количества и распределения подкожного жира. Дисперсионный анализ не выявил статистически значимых различий между абсолютными значениями жировой массы в составе тела юношей и девушек. Однако при изучении относительного содержания компонентов тела (в процентах от массы тела) выяв-

лено, что масса жирового компонента у девушек статистически значимо больше, чем у юношей ($P < 0,001$) (табл. 3). Это свидетельствует о более выраженном участии жирового компонента в формировании тела девушек. Различий в топографии жиросотложения в обеих группах не было выявлено. Подкожно-жировой слой и у девушек, и у юношей распределен неравномерно с преобладанием в нижних отделах туловища с максимальными значениями на животе и бедрах. Половых различий в толщине кожно-жировых складок не выявлено только на спине, тогда как толщина всех остальных складок у девушек статистически значимо ($P < 0,001$) превышает толщину складок у юношей (рис. 2).

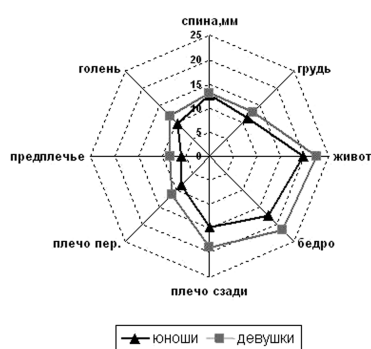


Рис. 2. Сравнительная характеристика распределения подкожно-жирового слоя у девушек и юношей

Распределение выраженности жировой массы у обследованного контингента юношей было следующим: низкую степень имели 24 % юношей, высокую – 9,8 %, среднюю – 65,4 %. Среди девушек низкую степень выраженности жировой массы имели 25 %, высокую – 10,1 %, среднюю – 64,8 % от общего числа обследованных. Самым выраженным в абсолютных и относительных единицах был мышечный компонент (табл. 3). Абсолютные цифры дают представление об общем развитии мышц, а по относительным значениям можно судить о гармоничности развития мышечного компонента в соответствии с другими показателями [16]. У обследованных юношей низкую степень выраженности мышечного компонента имели 24,1 %, высокую – 9,8 %, среднюю – 64,1 %. Полученные цифры свидетельствуют о достаточно хорошем развитии мышечного компонента у молодых людей. Средние значения показателей костного компонента юношей статистически значимо превышали аналогичные показатели девушек, это превы-

шение составило 3,1 кг и 1,5 %. Распределение выраженности костной массы у обследованных юношей показало, что 26,8 % имеют низкую костную массу, 10,1 % – высокую, у девушек низкую костную массу имеют 23 %, высокую – 11,3 %.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенный анализ антропометрических параметров и компонентов тела у лиц юношеского возраста, проживающих в условиях Европейского Севера, показал значимые половые различия средних значений габаритных размеров тела, различия компонентного состава, выражающиеся в преобладании мышечной и костной массы у юношей, и выраженное преобладание у девушек жировой массы. В исследовании было выявлено, что масса и длина тела современных юношей в Республике Карелии в сравнении с данными сверстников 80-х годов прошлого столетия имеют четкую тенденцию к увеличению. У девушек при больших значениях длины тела значения массы тела снизились. Дефицит массы в популяции современных девушек отмечают многие авторы как социальный фактор, предполагая, что нынешнее поколение молодых женщин под влиянием моды стремится к модельной внешности. Окружающая среда стимулирует развитие отдельных морфофункциональных структур тела, обеспечивающих наилучший уровень приспособления к условиям Севера. В результате исследования выявлены региональные особенности антропометрических параметров и компонентов тела у лиц юношеского возраста. Карельские юноши при отсутствии различий в длине тела отличаются большим весом, который обусловлен преобладанием жирового и мышечного компонентов. Карельские девушки незначительно отличаются от своих сверстниц из других регионов длиной тела, но средние значения массы тела у них выше значений аналогичного показателя девушек, проживающих в Центре России, и меньше значений представительниц Сибири и Юга России; при большем содержании жировой и мышечной массы девушки отличаются меньшими значениями костной массы. Данные, полученные в результате исследования в Республике Карелии, показывают тенденцию роста числа юношей и девушек с повышенной массой тела за счет увеличения массы жирового компонента, что говорит о формировании фенотипа, адаптированного к условиям проживания в северном регионе.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Галкина Т. Н. Антропометрические и соматотипологические особенности лиц юношеского возраста в Пензенском регионе: Автореф. дис. ... канд. мед. наук. Волгоград, 2008. 21 с.
2. Гребнева Н. Н. Эколого-физиологический портрет современных детей и подростков в условиях Тюменской области. Тюмень: Изд-во ТюмГУ, 2006. 240 с.

3. Доршакова Н. В. Качество окружающей среды и здоровье человека в условиях Карелии. Петрозаводск: Изд-во ПетрГУ, 1997. 204 с.
4. Казакова Т. В. Конституциональные особенности физического статуса, вегетативной регуляции и метаболизма клеток иммунной системы в юношеском возрасте: Автореф. дис. ... д-ра мед. наук. Красноярск, 2009. 43 с.
5. Калмин О. В., Афанасиевская Ю. С., Галкина Т. Н. Соматотипологическая характеристика студентов Краснодарского края // *Фундаментальные исследования*. 2009. № 7. С. 51–52.
6. Литовченко О. Г., Винокурова И. В. Морфофункциональное состояние юношей допризывного возраста Среднего Приобья с различным северным стажем // *Экология человека*. 2006. № 10. С. 8–11.
7. Мартиросов Э. Г. Методы исследования в спортивной антропологии. М.: ФиС, 1982. 200 с.
8. Мартиросов Э. Г., Николаев С. Г., Руднев Д. В. Технологии и методы определения состава тела. М.: Наука, 2006. 248 с.
9. Негашева М. А., Мишкова Т. А. Антропометрические параметры и адаптационные возможности студенческой молодежи к началу XXI века // *Российский педиатрический журнал*. 2005. № 5. С. 12–16.
10. Никитюк Б. А. Акселерация развития. Итоги науки и техники ВИНТИ. Сер. «Антропология». М.: ВИНТИ, 1989. С. 3–76.
11. Николаев В. Г., Гребенникова В. В., Ефремова В. П., Сапожников В. А., Шарайкина Е. П. Онтогенетическая динамика индивидуально-типологических особенностей организма человека. Красноярск: Амальгама, 2001. 172 с.
12. Николаев В. Г., Николаева Н. Н., Синдеева Л. В., Николаева Л. В. Антропологическое обследование в клинической практике. Красноярск: Изд-во ООО «Версо», 2007. 173 с.
13. Рубис Л. В., Масюк В. С., Хурцилава О. Г., Щербо А. П. Природные и социальные факторы риска заболеваемости острыми респираторными инфекциями // *Эпидемиология и инфекционные болезни*. 2008. № 5. С. 34–38.
14. Сафонова Ж. Б., Шевелева И. Н. Профилактика нарушения репродуктивного здоровья студенток средствами физической культуры // *Теория и практика физической культуры*. 2007. № 1. С. 17–18.
15. Смолянский Г. Б., Стафеев В. Ф. Методика изучения и оценки индивидуального физического развития юношей и девушек. Петрозаводск: Изд-во ПетрГУ, 1988. 27 с.
16. Щедрин А. С. Морфофункциональные показатели организма мужчин в онтогенетическом аспекте // *Материалы науч. конф. «Актуальные вопросы биомедицинской и клинической антропологии»*. Красноярск; Томск, 1996. С. 49.
17. Ямпольская Ю. А., Година Е. З. Состояние, тенденции и прогноз физического развития детей и подростков России // *Российский педиатрический журнал*. 2005. № 1. С. 30–39.
18. Matiegka J. The testing of physical efficienc // *Amer. J. Phys. Antropol.* 1921. Vol. 4. P. 223–230.

УДК 577.112.856:577.212:616.1(470.22)

ЛЮДМИЛА ВЛАДИМИРОВНА ТОПЧИЕВА

кандидат биологических наук, старший научный сотрудник Института биологии, Карельский научный центр РАН

*topchiev@krc.karelia.ru***НИКОЛАЙ ЛЬВОВИЧ РЕНДАКОВ**

кандидат биологических наук, научный сотрудник Института биологии, Карельский научный центр РАН

*nlrend@mail.ru***СЕРГЕЙ НИКОЛАЕВИЧ КОЛОМЕЙЧУК**

кандидат биологических наук, научный сотрудник Института биологии, Карельский научный центр РАН

*sergey_kolomeychuk@rambler.ru***ЭДУАРД ВЛАДИМИРОВИЧ ГУРОВ**

аспирант Института биологии, Карельский научный центр РАН

*gurov_ev@pochta.ru***ВИКТОРИЯ АЛЕКСЕЕВНА КОРНЕВА**

кандидат медицинских наук, Больница скорой медицинской помощи (г. Петрозаводск)

*vikkorneva@mail.ru***ИРИНА ЕВГЕНЬЕВНА МАЛЫШЕВА**

кандидат биологических наук, научный сотрудник Института биологии, Карельский научный центр РАН

*mal-ir@mail.ru***РОЛЬ ПОЛИМОРФНЫХ ВАРИАНТОВ ГЕНА АПОЛИПОПРОТЕИНА E
В РАЗВИТИИ СЕРДЕЧНО-СОСУДИСТЫХ ЗАБОЛЕВАНИЙ
У ЖИТЕЛЕЙ РЕСПУБЛИКИ КАРЕЛИИ**

Изучено распределение частот аллелей и генотипов гена аполипопротеина E в группах лиц, страдающих сердечно-сосудистыми заболеваниями, и людей из контрольной группы. Показано, что частота аллеля e4 и генотипа e3/e4 выше у пациентов с диагнозами артериальная гипертензия и обширный инфаркт миокарда, чем в контрольной группе. Наличие в генотипе аллеля e4 в 2 раза повышает риск развития сердечно-сосудистых заболеваний у жителей Карелии. Обнаружена ассоциация между наличием аллеля e4 в генотипе и развитием сердечно-сосудистых заболеваний.

Ключевые слова: сердечно-сосудистые заболевания, артериальная гипертензия, обширный инфаркт миокарда, аполипопротеин E, полиморфизм длин рестрикционных фрагментов

Нарушение липидного обмена является одним из факторов, способствующих возникновению сердечно-сосудистых заболеваний (ССЗ), таких как ишемическая болезнь сердца (ИБС) и обширный инфаркт миокарда (ОИМ). Существенную роль в метаболизме липидов играет белок плазмы крови аполипопротеин E (ApoE). Он выступает в качестве лиганда для рецепторов липопротеинов низкой плотности (ЛПНП) клеток печени. Ген *apoE*, кодирующий данный полипептид, расположен на 19-й хромосоме и имеет несколько полиморфных сайтов как в промоторной части, так и в экзонах. Самый изученный из них – полиморфизм в позициях 3937C/T и 4075C/T. Замена нуклеотидов приводит к замене аминокислот в положениях 112 и 158 аминокислотной последовательности белка, что, в свою очередь, способствует изменению сродства ApoE к рецепторам. Последнее обстоятельство влияет на уровень холестерина и других показателей липидного обмена в плазме крови. Так, показано, что наличие в генотипе аллеля e4 ассоцииру-

ется с атерогенным профилем, повышенным уровнем холестерина, липопротеинов низкой плотности в крови [4], [5]. Аллелю e2, напротив, приписывают протективную, антиатерогенную роль. У носителей этого аллеля, как правило, понижено содержание холестерина и повышено содержание триглицеридов [12]. Результаты исследований, проведенных в ряде европейских и азиатских стран, позволяют отнести аллель e4 к независимому фактору риска возникновения кардиоваскулярных расстройств [14]. Однако для населения других стран, например Финляндии, взаимосвязи между наличием в генотипе аллеля e4 и развитием сердечно-сосудистых заболеваний обнаружено не было [5], [9]. Таким образом, связь полиморфизма гена *apoE* с развитием ССЗ у разных групп населения специфична, что указывает на важность изучения этой проблемы в разных этнических группах и у жителей регионов с различными климато-географическими факторами. Необходимо отметить, что у населения Карелии, проживающего в

условиях нестабильного климата и светового режима Европейского Севера, полиморфизм гена *apoE*, который может быть связан с риском развития ССЗ, до настоящего времени не изучался.

Цель настоящего исследования состояла в изучении роли полиморфизма гена аполипопротеина Е в развитии сердечно-сосудистых заболеваний у населения Республики Карелия.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

В работе использовали образцы крови 138 доноров без клинических проявлений ССЗ (контрольная группа) и 110 образцов крови больных, перенесших ОИМ и страдающих АГ. Диагнозы ИБС и ОИМ устанавливали в соответствии с МКБ-10 и с учетом клинических рекомендаций ВНОК (2008), диагноз АГ – в соответствии с третьим пересмотром клинических рекомендаций ВНОК (2008). Средний возраст обследованных в контрольной группе и пациентов с ССЗ составил 36,7 и 61,0 года соответственно.

ДНК выделяли из крови на колонках для выделения ДНК «Ахургер» (Ахуген) согласно инструкции к набору. Качество и количество выделенной ДНК оценивали спектрофотометрически (SmartSpec Plus, Bio-Rad).

Исследование распределения аллелей гена *apoE* проводили методом полиморфизма длин рестрикционных фрагментов (ПДРФ). Для амплификации гена *apoE* использовали следующую пару праймеров: прямой 5'-acagaattcgccccggcctgtacac-3', обратный 5'-taagcttgacacggctgtccaagga-3' [8]. Полимеразную цепную реакцию (ПЦР) проводили в амплификаторе iCycler iQ5 (Bio-Rad). Реакционная смесь для ПЦР объемом 30 мкл содержала: 50 нг ДНК исследуемых образцов, 100 пМ обратного и прямого праймеров, 1 ед. Таq полимеразы (Силекс), 0,2 мМ dNTP, 2,5 мкл 10хбуфера для Таq полимеразы, 3 % DMSO согласно инструкции к набору для ПЦР (Силекс). Условия ПЦР: денатурация – 2 мин при 94 °С, отжиг – 1 мин при 60 °С, элонгация – 1 мин при 72 °С; количество циклов – 35; дотраивание фрагментов – 10 мин при 72 °С. ПЦР-фрагменты в течение 15 ч при 37 °С обрабатывали эндонуклеазой рестрикции NhaI (5 е. а.) (Fermentas) согласно инструкции к набору.

ПЦР-продукты разделяли в 8 % полиакриламидном геле (ПААГ), используя трис-боратный буфер. ПЦР-продукты окрашивали бромистым этидием, визуализировали в проходящем УФ-свете и анализировали с помощью программы Kodak 1D. Аллели и генотипы определяли в соответствии с J. E. Nixson и D. T. Vernier [8]. Статистический анализ данных осуществляли с помощью пакета программ MS Excel 2005. Достоверность различий частот в группах оценивали по критерию χ^2 , критерию Фишера с преобразованием [2].

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

В результате ПДРФ-анализа были получены, согласно J. E. Nixson и D. T. Vernier [8], следующие аллельные варианты гена *apoE*: e2 (Cys112, Cys158), e3 (Cys112, Arg158), e4 (Arg112, Arg158) и генотипы: три гомозиготных (e2/e2, e3/e3, e4/e4) и три гетерозиготных (e2/e3, e2/e4, e3/e4).

Обнаружено, что самый распространенный аллель в исследуемой выборке – аллель e3, а самый распространенный генотип – e3/e3 (табл. 1). Необходимо отметить, что встречаемость этого аллеля и генотипа у жителей Карелии такая же, как и в большинстве популяций мира [11]. Частоты других аллелей и генотипов гена *apoE* у здоровых жителей Карелии близки к частотам, характерным для населения стран Центральной и Восточной Европы, некоторых регионов России, например для русского населения Костромской области и бурятов [1], [4]. Генотип e4/e4 в исследуемой выборке встречался только у одного индивида, перенесшего ОИМ.

Таблица 1

Частоты аллелей и генотипов гена *apoE* среди обследованных доноров

Аллели и генотипы	Здоровые (n = 138)	Больные ССЗ (n = 110)
e2	0,09	0,11
e3	0,76	0,67
e4	0,14	0,22
Критерий χ^2		3,16 (p > 0,05)
e2/e2	0,04	0,05
e2/e3	0,08	0,07
e2/e4	0,03	0,05
e3/e3	0,59	0,44
e3/e4	0,26	0,49
Критерий χ^2		7,22 (p > 0,05)

В группе пациентов с сердечно-сосудистыми патологиями обнаружено 55 % носителей аллеля e4, тогда как лиц, у которых этот аллель отсутствовал, – лишь 38 %. В контрольной группе, напротив, количество людей, в генотипе которых не было аллеля e4, преобладало над числом его носителей. Причем отличие в распределениях было достоверно по критерию χ^2 (p < 0,05) (табл. 2). Наличие в генотипе аллеля e4 почти в 1,5 раза повышает риск развития ССЗ у жителей Карелии (относительный риск RR = 1,45).

Таблица 2

Соотношение здоровых и больных ССЗ жителей Карелии в зависимости от наличия аллеля e4 гена *apoE*

	Отсутствие аллеля e4	Наличие аллеля e4
Здоровые	0,62 (n = 98)	0,45 (n = 40)
Больные ССЗ	0,38 (n = 61)	0,55 (n = 49)
Критерий χ^2		6,7 (p < 0,05)
Критерий Фишера (F)	15 (p < 0,05)	2,4 (p > 0,05)

Из данных табл. 1 следует, что частота аллеля *e4* и генотипа *e3/e4* выше в группе людей, страдающих ССЗ. Среди пациентов, которым поставлен диагноз АГ и ОИМ, носителей аллеля *e4* и генотипа *e3/e4* также больше, чем в контрольной группе (табл. 3).

Таблица 3

Частоты аллелей и генотипов гена *apoE* среди здоровых доноров и больных АГ и ИБС

Аллели и генотипы	Здоровые (n = 138)	Больные АГ (n = 62)	Больные ОИМ (n = 31)
<i>e2</i>	0,09	0,11	0,16
<i>e3</i>	0,76	0,69	0,61
<i>e4</i>	0,14	0,19	0,23
Критерий χ^2		1,15 ($p > 0,05$)	3,3 ($p > 0,05$)
<i>e2/e2</i>	0,04	0,05	0,06
<i>e2/e3</i>	0,08	0,08	0,13
<i>e2/e4</i>	0,03	0,05	0,06
<i>e3/e3</i>	0,59	0,48	0,35
<i>e3/e4</i>	0,26	0,34	0,39
Критерий χ^2		2,4 ($p > 0,05$)	6,1 ($p > 0,05$)

Зависимость частоты ССЗ от наличия в генотипе обследованных тех или иных аллелей гена *apoE* обусловлена уровнем холестерина и липопротеинов низкой плотности. Изоформы белка АроЕ, соответствующие аллелям гена, имеют разную эффективность связывания с рецептором ЛПНП. Белок АроЕ как лиганд ЛПНП-рецептора участвует в превращении липопротеинов промежуточной плотности (ЛППП) в ЛПНП [3].

Выведение ремнантных частиц, содержащих АроЕ *e2*, происходит очень медленно из-за неэффективного связывания этой изоформы белка с соответствующими рецепторами, при этом превращение ЛППП в ЛПНП нарушено. Снижение вследствие этого доставки холестерина в печень приводит к увеличению синтеза ЛПНП-рецепторов и, соответственно, к уменьшению концентрации ЛПНП в плазме. Выведение частиц, несущих АроЕ *e4*, напротив, идет быстрее, чем выведение нормальных частиц, что замедляет синтез ЛПНП-рецепторов и увеличивает уровень холестерина ЛПНП плазмы.

Следует отметить, что хотя аллелю *e2* приписывают протективное значение, у людей, гомозиготных по этому аллелю, может развиваться гиперлиппротеинемия III типа.

Анализ распределения аллелей гена аполипопротеина Е в зависимости от пола показал отсутствие статистически значимых различий в частотах аллелей у мужчин в контрольной группе и у больных ССЗ. Однако из результатов табл. 4 следует, что в группе мужчин, страдающих сердечно-сосудистыми расстройствами, частота аллеля *e2* была больше, чем у здоровых. Эти данные несколько противоречат общепри-

знанному представлению о протективной роли аллеля *e2*. Однако их можно объяснить и наличием других независимых факторов возникновения ССЗ у мужчин, например зависимостью от табака. Так, в исследованиях, проведенных на мужчинах корейской национальности, имеющих пристрастие к курению, показано, что несмотря на низкие показатели общего холестерина в плазме крови, в этой группе лиц была высокая частота ИБС и других сердечно-сосудистых расстройств [9]. Интересно, что курение также может модифицировать влияние полиморфных вариантов гена *apoE* на уровень триглицеридов [13]. Так, в плазме крови курящих мужчин независимо от наличия в генотипе аллелей гена *apoE* наблюдали более низкие значения триглицеридов по сравнению с некурящими людьми.

Таблица 4

Распределение аллелей и генотипов гена *apoE* среди здоровых и больных ССЗ доноров в зависимости от пола

	Аллели и генотипы							
	<i>e2</i>	<i>e3</i>	<i>e4</i>	<i>e2/e2</i>	<i>e2/e3</i>	<i>e2/e4</i>	<i>e3/e3</i>	<i>e3/e4</i>
Мужчины здоровые (n = 44)	0,11	0,76	0,13	0,07	0,07	0,02	0,61	0,23
Мужчины больные (n = 35)	0,16	0,63	0,21	0,06	0,11	0,09	0,40	0,34
Женщины здоровые (n = 87)	0,08	0,78	0,14	0,02	0,08	0,03	0,62	0,24
Женщины больные (n = 57)	0,09	0,71	0,20	0,04	0,07	0,04	0,49	0,37

Среди женщин, в генотипе которых отсутствовал аллель *e4*, количество больных было достоверно меньше (табл. 5). Эти данные, на наш взгляд, могут свидетельствовать о возможной протективной роли аллелей *e2*, *e3*. Следовательно, можно говорить о влиянии различных генотипов и аллелей гена *apoE* на развитие ССЗ у женщин. Этот вывод может быть косвенно подтвержден данными литературы о существенном влиянии аллелей гена *apoE* на уровень липопротеинов высокой плотности и триглицеридов у женщин, но не у мужчин [13]. Наличие в генотипе аллеля *e4* может способствовать развитию гиперлиппротеинемии и атеросклероза, причем в большей степени у женщин, чем у мужчин [7].

Таблица 5

Соотношение здоровых и больных ССЗ женщин в зависимости от наличия аллеля *e4* гена *apoE*

Женщины	Отсутствие аллеля <i>e4</i>	Наличие аллеля <i>e4</i>
Здоровые	0,65 (n = 63)	0,49 (n = 24)
Больные ССЗ	0,35 (n = 34)	0,51 (n = 23)
Критерий χ^2		3,4 ($p > 0,05$)
Критерий Фишера (F)	8,2 ($p < 0,05$)	0

Таким образом, результаты исследования показали, что у жителей Карелии, в генотипе которых имеется аллель $\epsilon 4$, повышен риск развития кардиоваскулярных расстройств. Влияние этого аллеля на развитие ССЗ особенно выражено у женщин.

Работа выполнена при финансовой поддержке программы Президиума РАН «Фундаментальные науки – медицине» и Гранта Президента РФ «Ведущие научные школы РАН» НШ-3731.2010.4.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Боринская С. А., Кальина Н. Р., Санина Е. Д. и др. Полиморфизм гена аполипопротеина Е ApoE в популяциях России и сопредельных стран // Генетика. 2007. Т. 43. № 10. С. 1434–1440.
2. Ивантер Э. В., Коросов А. В. Основы биометрии: Введение в статистический анализ биологических явлений и процессов: Учеб. пособие. Петрозаводск: Изд-во ПетрГУ, 1992. 168 с.
3. Титов В. Н. Физиологические основы транспорта в крови жирных кислот // Лаборатория. 1997. № 9.
4. Bernstein M. S., Costanza M. C., James R. W., Morris M. A., Cambien F., Raoux S., Morabia A. Physical activity may modulate effects of ApoE genotype on lipid profile // Arterioscler. Thromb. Vasc. Biol. 2002. Vol. 22. P. 133–140.
5. Dallongeville J., Lussier-Cacan S., Davignon J. Modulation of plasma triglyceride levels by apoE phenotype: a meta-analysis // J. Lipid Res. 1992. Vol. 33. P. 447–454.
6. Damaraju S., Yu Q. T., Safavi F., Marian A. J. Apolipoprotein epsilon 4 is not a genetic risk factor for coronary artery disease or restenosis after percutaneous transluminal coronary angioplasty // Am. J. Cardiol. 1995. Vol. 75. P. 1181–1183.
7. Heng O. K., Saha N., Toy J. S. H. Lack of association of apolipoprotein E polymorphism with plasma Lp(a) levels in the Chinese // Clin. Genetics. 1995. Vol. 48. P. 113.
8. Hixson J. E., Vernier D. T. Restriction isotyping of human apolipoprotein E by gene amplification and cleavage with HhaI // Journal of Lipid Research. 1990. Vol. 31. P. 545–548.
9. Jee S. H., Suh I., Kim I. S., Appel L. J. Smoking and atherosclerotic cardiovascular disease in men with low levels of serum cholesterol: The Korea medical insurance corporation study // JAMA. 1999. Vol. 282. № 22. P. 2149–2155.
10. Kuusisto J., Mykkanen L., Kervinen K., Kesaniemi Y. A., Laakso M. Apolipoprotein E4 phenotype is not an important risk factor for coronary heart disease or stroke in elderly subjects // Arterioscler. Thromb. Vasc. Biol. 1995. Vol. 15. P. 1280–1286.
11. Mahley R. W. Apolipoprotein E: cholesterol transport protein with expanded role in cell biology // Science. 1988. Vol. 240. P. 622–630.
12. Ruixing Y., Shangling P., Jinzhen W., Weixiong L., Dezhai Y. Apolipoprotein E gene polymorphism and serum lipid levels in the Guangxi Hei Yi Zhuang and Han populations // Exp. Biol. Med. 2008. Vol. 233. P. 409–418.
13. Shin M.-H., Kim H. N., Cui L.-H., Kweon S.-S., Park K.-S., Heo H., Nam H.-S., Jeong S.-K., Chung E.-K., Choi J.-S. The effect of apolipoprotein E polymorphism on lipid levels in Korean adults // J. Korean Med. Sci. 2005. Vol. 20. P. 361–366.
14. Song Y., Stampfer M. S., Liu S. Meta-analysis: apolipoprotein E genotype and risk for coronary heart disease // Annals of Internal Medicine. 2004. Vol. 141. № 2. P. 137–161.

ВЛАДИМИР АЛЕКСАНДРОВИЧ АНАНЬЕВ

кандидат сельскохозяйственных наук, доцент, заведующий лабораторией лесоведения и лесоводства Института леса, Карельский научный центр РАН
ananyev@krc.karelia.ru

СВЕТЛАНА ИВАНОВНА ГРАБОВИК

кандидат биологических наук, старший научный сотрудник лаборатории болотных экосистем Института биологии, Карельский научный центр РАН
grabovik@bio.krc.karelia.ru

ОСОБЕННОСТИ ФОРМИРОВАНИЯ РАСТИТЕЛЬНОГО ПОКРОВА В СРЕДНЕТАЕЖНЫХ КОРЕННЫХ ЕЛЬНИКАХ ПОСЛЕ СПЛОШНОГО ВЕТРОВАЛА

В первые годы после ветровала отбор растений, способных к произрастанию на обнаженной почве, идет под влиянием таких факторов, как влажность почвы, освещенность, трофность местообитания. Биоразнообразие напочвенного покрова возрастает за счет пионерных видов зеленых мхов рода *Dicranella* и рода *Polytrichum*, предпочитающих обнаженные почвы. Установлено, что через 10 лет на участках сплошного ветровала имеется необходимое количество (2–7 тыс. экз./га) подроста для формирования коренных лесов с преобладанием ели.

Ключевые слова: коренные ельники, ветровал, подрост, напочвенный покров

По данным всемирного исследования лесных ресурсов, 26 % всех девственных лесов мира находится на территории России. Значительная часть этих лесов расположена в границах национальных парков, заповедников и других особо охраняемых природных территорий. В европейской части России территория НП «Водлозерский» является уникальной по площади хорошо сохранившихся коренных лесов на равнинных ландшафтах.

Лесные земли парка занимают 51,1 % его общей площади, при этом практически все они покрыты лесами естественного происхождения. На территории парка преобладают ельники – 50,2 %. Здесь они рассматриваются в качестве зонального типа растительности и эталона биоразнообразия. Экологический спектр еловых лесов широк и представлен 9 типами леса: от бедных сфагновых до самых производительных (кисличных). Для ельников характерно абсолютное преобладание черничного типа (67 %). Второе место по площади занимают долгомошники (23 %). Остальные типы леса представлены незначительно. Продуктивность ельников парка варьирует от II до Va класса бонитета. При этом древостои IV и V классов бонитета, занимающие 95 % площади еловых лесов, представлены почти равными долями.

На долю коренных ельников приходится 88 % общей лесопокрытой площади еловых лесов парка. Они сформировались в результате длительного существования на занимаемой территории и представляют собой наиболее устойчивые стадии естественной динамики лесных сообществ. Здесь произрастают насаждения с возрастом основного поколения 140–240 лет. Еловые

леса парка представлены различными типами возрастной динамики, от одновозрастных (разница в возрасте деревьев не превышает 40 лет) до абсолютно разновозрастных, где возраст ели варьирует в очень широких пределах, начиная со всходов (1–2 года) и заканчивая возрастом естественного отмирания (250–350 лет). При этом отдельные экземпляры ели доживают до 430 лет. Наиболее представлены относительно-разновозрастные ельники (44 %). Примерно на 1/5 площади еловых лесов произрастают абсолютно-разновозрастные насаждения. В небольшом количестве встречаются отдельные участки условно-одно-возрастных ельников (13,1 %), которые сформировались в результате воздействия стихийных сил природы (пожары, ураганные ветры).

В массивах коренных малонарушенных лесов существует ряд механизмов их естественного обновления. В таежной зоне к ним относятся обширные массовые ветровалы. Такое явление не обошло и территорию НП «Водлозерский». Ветровал, образовавшийся на довольно значительной площади в юго-западной части НП «Водлозерский» в 2000 году, является уникальным научным объектом. С помощью мониторинга на его территории можно проследить протекание ранних стадий растительных сукцессий, начинающихся после разрушения климаксового лесного сообщества. Особенности формирования напочвенного покрова и ход естественного восстановления коренных лесов на территориях, подвергшихся массовому ветровалу, рассматриваются в сравнительно немногочисленных работах как у нас в стране, так и за рубежом. Так, в монографии Е. Б. Скворцовой, Н. Г. Улановой, В. Ф. Басевич «Экологическая роль ветро-

валов» [9] определена роль единичных и групповых ветровальных нарушений в сохранении биоразнообразия в естественных малонарушенных лесах; приведены данные, характеризующие масштабы этих явлений, и дан анализ изучения динамических процессов, происходящих при этих нарушениях. По результатам длительных наблюдений, проводимых Н. Г. Улановой в Центрально-лесном заповеднике (южная тайга), выявлен ряд особенностей формирования растительности на ветровально-почвенных комплексах [11]. В работе Р. З. Сибгатуллина [8] основной акцент сделан на изучении динамики усыхания (отпада) пихтоельника высокотравно-папоротникового после катастрофического ветровала в Висимском заповеднике (Свердловская область). Здесь же приведены виды растений, появившиеся на 9-й год после ветровала. В статье М. Ю. Пукинской [7] рассматривается «оконная» динамика развития еловых древостоев, при которой не происходит столь существенных изменений экологической среды, как это наблюдается при сплошных ветровалах; дан анализ появления новых генераций ели в «окнах».

В условиях средней тайги на Северо-Западе России комплексные исследования (включая древостой, напочвенный покров, грибы, стволовые вредители) в коренных еловых лесах после сплошного ветровала проводятся впервые в НП «Водлозерский» [3], [4].

Цель исследований – изучение хода естественного возобновления и особенностей формирования напочвенного покрова в массивах коренных еловых лесов, подвергшихся сплошному ветровалу.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Исследования динамики напочвенного покрова и естественного возобновления на участках сплошного ветровала в НП «Водлозерский» ведутся с 2001 года. Парк расположен на юго-восточной окраине Фенноскандии между 62°08' – 63°36' с. ш. и 36°15' – 37°35' в. д. (зона средней тайги). Характеристика природных условий НП «Водлозерский» и объектов исследования содержится в работе В. А. Ананьева и Б. В. Раевского [2].

В течение 2001–2004 годов нами была заложена серия постоянных пробных площадей, где ведутся наблюдения за развитием и формированием напочвенного покрова и ходом естественного возобновления на участках сплошного ветровала в среднетаежных коренных ельниках [1].

По материалам лесоустройства и наземной таксации установлено, что общая площадь сплошного компактного ветровала на территории парка составила 640 га с объемом ветровальной древесины 130 тыс. м³. На долю ельников приходится 85 %, сосняков – 13 %, березняков – 2 % общей площади ветровала. Ельники до ветровала были представлены черничным ти-

пом леса IV класса бонитета. Возраст основного поколения ели составлял 190–210 лет. По типам возрастных структур ельники распределились следующим образом: абсолютно разновозрастные – 41 %, относительно разновозрастные – 59 % от общей площади ветровальных ельников. Значительная часть насаждений относилась к категории среднеполнотных (0,5–0,7) – 66 %, доля высокополнотных (0,8 и выше) составила 34 %. Помимо основного сплошного ветровала произошли многочисленные локальные вывалы елей, разбросанные пятнами в юго-западной части парка до устья р. Илексы.

На пробных площадях, заложенных на участках сплошного ветровала, осуществлялся переучет ветровальной древесины по породам и ступеням толщины. Отдельно учитывались живые, оставшиеся после ветровала на корню тонкомерные деревья. Учет естественного возобновления производился по породам, группам высот и состоянию (жизнеспособный, нежизнеспособный и сухостой) на 2-метровых лентах, расположенных вдоль одной из сторон пробной площади.

На пробных площадях выполнялись геоботанические описания напочвенного покрова по общепринятой методике [6]. После сплошного ветровала образуются микроэкотопы. Микроэкоотоп включает почвенный ком с корневой системой и стволом вываленных деревьев, западины вывалов и поверхность с ненарушенным напочвенным покровом между ними. В пределах каждого ветровального комплекса (ВК) закладывались постоянные метровые площадки: на открытых участках с ненарушенным растительным покровом («окнах») между поваленными деревьями и на обнаженной почве на месте выворота деревьев. На площадках отмечалось для цветковых растений обилие по Друде и проективное покрытие в процентах, а для сфагновых мхов – только проективное покрытие. Листостебельные мхи были определены старшим научным сотрудником, кандидатом биологических наук М. А. Бойчук (Институт биологии Карельского научного центра РАН).

Результаты исследования структуры и особенностей формирования напочвенного покрова, а также хода естественного восстановления коренных лесов после массового ветровала представлены на примере двух пробных площадей, заложенных в ельнике брусничном и ельнике чернично-сфагновом.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Видовое разнообразие напочвенного покрова в пределах одного типа леса может изменяться в той или иной мере в зависимости от особенностей роста древостоев. Так, крупные «окна», возникшие на месте вывала деревьев с большим количеством валежа разных стадий разложения, чередуются с сомкнутыми группами елей.

Увеличение разнообразия микроместообитаний может привести к возрастанию биологического разнообразия и суммарного числа видов в травяно-кустарничковом и моховом ярусах. Влияние вышеперечисленных факторов на биоразнообразие напочвенного покрова изучалось на ВК.

Динамика напочвенного покрова

Флористический состав ельника чернично-сфагнового довольно бедный (табл. 1). При геоботаническом описании ВК во флористическом составе отмечены 27 видов: деревья – 3, кустарники – 1, кустарнички – 2, травы – 7, сфагновые мхи – 3, зеленые мхи – 11.

Таблица 1

Динамика видового состава и проективного покрытия (%) на ветровальном комплексе ельника чернично-сфагнового

Видовой состав	Участки с ненарушенным растительным покровом	Участки с западинами вывалов	Год исследования					
			2002			2005		
			2002	2005	2009	2002	2005	2009
<i>Betula pubescens</i>	–	–	+	–	–	–	–	+
<i>Picea abies</i>	–	–	+	–	–	–	–	+
<i>Pinus sylvestris</i>	–	–	+	–	–	–	–	–
<i>Populus tremula</i>	–	+	+	–	–	–	–	–
<i>Salix caprea</i>	–	–	–	–	–	–	–	+
<i>Vaccinium myrtillus</i>	40	5	3	–	–	–	–	–
<i>Vac. vitis-idaea</i>	15	45	30	10	10	10	10	10
<i>Carex globularis</i>	15	5	1	–	5	5	5	5
<i>Lerchenfeldia flexuosa</i>	10	5	15	–	+	1	–	–
<i>Equisetum sylvaticum</i>	1	1	+	7	7	5	–	–
<i>Chamanerion angustifolium</i>	–	–	–	1	1	1	–	–
<i>Linnaea borealis</i>	3	+	–	–	+	–	–	–
<i>Majanthemum bifolium</i>	+	+	+	–	+	–	–	–
<i>Trientalis europaea</i>	1	+	+	–	–	–	–	–
<i>D. polysetum</i>	+	1	+	–	1	–	–	–
<i>D. scoparium</i>	+	1	+	–	1	+	–	–
<i>Dicranella heteromalla</i>	–	–	–	–	10	–	–	–
<i>Dicranella cerviculata</i>	–	–	–	–	5	–	–	–
<i>Hylocomium splendens</i>	1	+	+	–	–	–	–	–
<i>Pleurozium schreberi</i>	5	30	30	–	10	1	–	–
<i>Pogonatum urnigerum</i>	–	–	–	–	5	1	–	–
<i>Pohlia nutans</i>	–	–	–	–	–	+	–	–
<i>Polytrichum commune</i>	5	–	+	15	15	15	–	–
<i>Pol. juniperinum</i>	–	–	–	+	3	5	–	–
<i>Ptilium crista-castrensis</i>	+	+	+	–	–	–	–	–
<i>Sphagnum angustifolium</i>	50	10	10	+	+	5	–	–
<i>S. magellanicum</i>	+	+	+	+	+	+	–	–
<i>S. russowii</i>	10	30	10	–	3	1	–	–

Растительный покров представлен кустарничково-травяно-сфагновыми сообществами. Травяной ярус по видовому составу очень бедный (табл. 2). Через два года после ветровала на

открытых участках с ненарушенным растительным покровом («окна») в кустарничковом ярусе доминировали черника и брусника, в травяном ярусе – *Carex globularis*, *Lerchenfeldia flexuosa*, в моховом – *Sphagnum angustifolium*, *S. russowii*.

На участках с обнаженной почвой были отмечены небольшие куртины *Vaccinium vitis-idaea* с *Equisetum sylvaticum* и отдельные особи пионерного вида, характерного для ВК, *Chamanerion angustifolium*. Моховой ярус представлен небольшими куртинками *Polytrichum commune*. Характерной особенностью напочвенного покрова является его пятнистое сложение, причиной этого может быть неравномерное расселение растений на новых, незанятых участках.

На 5-й год после ветровала были сделаны описания напочвенного покрова на постоянных метровых площадках. Анализ геоботанических описаний показал, что на открытых участках с ненарушенным растительным покровом идет существенное увеличение проективного покрытия *Vaccinium vitis-idaea*, присутствие черники резко снизилось (до 5 %), вероятно, это связано с освещенностью, травяной ярус очень разреженный, мхи растут пятнами: на повышениях *Pleurozium schreberi*, а *Sphagnum russowii* встречается небольшими дерновинками в понижениях.

На участках с обнаженной почвой (песок) были отмечены небольшие куртинки *Vaccinium vitis-idaea* и единичные особи *Equisetum sylvaticum*. Многочисленные местообитания с нарушенной почвой, связанные с природными катастрофами, такими как ветровал, оказываются вполне приемлемыми для обитания ряда видов зеленых мхов. К ним относятся пионерные виды, предпочитающие нарушенные почвы: *Dicranella heteromalla*, *Dicranella cerviculata*, *Pogonatum urnigerum*, *Polytrichum juniperinum*. Все они характеризуют начальные стадии микросукцессий мхов на обнаженной почве.

На 10-й год после ветровала в травяно-кустарничковом ярусе доминируют брусника и *Lerchenfeldia flexuosa*; присутствие черники незначительное. В моховом ярусе по-прежнему постоянен *Pleurozium schreberi*, покрытие сфагновых мхов снижается.

На участках с обнаженной почвой *Vaccinium vitis-idaea* по-прежнему присутствует и произрастает отдельными кустиками, а травяной ярус развит слабо, присутствуют *Carex globularis* с *Equisetum sylvaticum*, но в виде единичных экземпляров. В моховом ярусе постоянны мхи родов *Polytrichum* и *Sphagnum*, но произрастают они небольшими дерновинками.

Ельник брусничный расположен на склоне, хорошо освещен. При геоботаническом описании ВК во флористическом составе ельника брусничного отмечены 43 вида: деревьев – 4, кустарников – 4, кустарничков – 2, трав – 16, сфагновых мхов – 5, зеленых мхов – 12.

Таблица 2

Динамика видового состава и проективного покрытия (%) на ветровальном комплексе ельника-брусничника

Видовой состав	Участки с ненарушенным растительным покровом			Участки с западинами вывалов		
	Год исследования					
	2002	2005	2009	2002	2005	2009
<i>Betula pubescens</i>	–	–	+	–	+	+
<i>Juniperus communis</i>	+	–	–	–	–	–
<i>Picea abies</i>	–	–	–	–	+	+
<i>Pinus sylvestris</i>	–	–	–	–	+	+
<i>Populus tremula</i>	+	+	+	–	–	+
<i>Salix caprea</i>	–	–	–	–	+	+
<i>Salix philicifolia</i>	–	–	–	–	+	+
<i>Rubus idaeus</i>	–	–	–	–	3	5
<i>Vaccinium myrtillus</i>	10	7	10	–	3	1
<i>Vac. vitis-idaea</i>	45	25	20	–	5	5
<i>Carex globularis</i>	–	–	–	–	1	+
<i>C. canescens</i>	–	–	–	–	1	1
<i>Calamagrostis epigeios</i>	+	7	10	15	3	5
<i>Lerchenfeldia flexuosa</i>	10	7	15	+	3	5
<i>Luzula pilosa</i>	+	+	+	+	+	–
<i>Equisetum sylvaticum</i>	+	–	–	+	+	1
<i>Chamanerion angustifolium</i>	–	+	–	–	1	1
<i>Convallaria majalis</i>	+	–	–	–	–	–
<i>Gymnocarpium dryopteris</i>	+	–	–	–	–	+
<i>Linnaea borealis</i>	3	–	–	–	+	1
<i>Lycopodium annotinum</i>	+	–	–	–	–	–
<i>Majanthemum bifolium</i>	5	3	1	–	1	+
<i>Melampyrum sylvaticum</i>	+	+	+	–	+	+
<i>Rubus saxatilis</i>	3	+	+	–	+	+
<i>Solidago virgaurea</i>	+	+	+	+	+	+
<i>Trientalis europaea</i>	+	+	+	–	+	+
<i>Dicranum majus</i>	5	–	–	–		
<i>D. polysetum</i>	3	15	3	–	–	–
<i>D. scoparium</i>	+	+	5	+	+	+
<i>Dicranella heteromalla</i>	–	–	–	+	+	+
<i>D. subulata</i>	–	–	–	–	15	15
<i>Hylocomium splendens</i>	20	1	+	–	–	–
<i>Pleurozium schreberi</i>	30	25	15	–	10	15
<i>Pogonatum urnigerum</i>	–	–	–	+	1	1
<i>Polytrichum commune</i>	3	10	25	+	65	25

<i>Pol. juniperinum</i>	–	–	–	25	–	–
<i>Ptilium crista-castrensis</i>	+	+	+	–	–	–
<i>Sphagnum angustifolium</i>	–	–	–	–	1	15
<i>S. fallax</i>	3	+	+	–	5	–
<i>S. girgensohnii</i>	10	3	3	–	–	+
<i>S. magellanicum</i>	–	–	–	–	–	+
<i>S. russowii</i>	–	–	–	–	+	3
<i>Tetraphis pellucida</i>	–	–	–	+	+	+

Первые описания растительного покрова ВК были сделаны через два года после ветровала. Основная часть ВК была занята кустарничково-разнотравно-зеленомошными сообществами. Здесь доминировали брусника с черникой, лесное мелкотравье и *Pleurozium schreberi*, *Hylocomium splendens*.

На участках с обнаженной почвой (песок) были отмечены небольшие куртины *Calamagrostis epigeios* и единичные особи *Equisetum sylvaticum*, *Luzula pilosa*, *Lerchenfeldia flexuosa*, а также зеленые мхи *Tetraphis pellucida*, *Dicranella heteromalla*, *Pogonatum urnigerum*, *Dicranum scoparium*, *Polytrichum juniperinum*. Все эти виды характеризуют начальные стадии микросукцессий мхов на обнаженной почве.

На 5-й год после ветровала были сделаны описания напочвенного покрова на открытых участках с ненарушенным растительным покровом. Здесь по-прежнему преобладают кустарничково-разнотравно-зеленомошные сообщества. В кустарничковом ярусе доминирует *Vaccinium vitis-idaea*, но ее проективное покрытие значительно снизилось, она растет небольшими кустиками. Травяной покров негустой, здесь преобладают злаковые, остальное мелкотравье необильно, но образует куртины или пятна. Моховой покров пятнами; встречаются *Pleurozium schreberi*, *Polytrichum commune*.

В результате анализа геоботанических описаний было установлено, что зарастание обнаженных участков идет очень быстро, в основном за счет активного заполнения вегетативно подвижных органов растений из окружающих растительных сообществ. Такое наступление на незанятую растительностью территорию осуществляется *Rubus idaeus*, *Rubus saxatilis*, *Maianthemum bifolium*, *Linnaea borealis*, *Calamagrostis epigeios*. Моховой покров несплошной и представлен *Pleurozium schreberi*, *Polytrichum commune*, *P. juniperinum*. В нижней части склона отмечены начальные стадии зарастания обнаженной почвы *Calamagrostis epigeios*, *Equisetum sylvaticum*, *Gymnocarpium dryopteris*, *Chamanerion angustifolium*. В моховом покрове также отмечены начальные стадии микросукцессий на обнаженной почве, для которых характерны *Dicranella heteromalla*, *Pogonatum urnigerum*, *Polytrichum commune*, *Pol. juniperinum*.

Через десять лет на ВК на открытых участках с ненарушенным растительным покровом по-прежнему преобладают кустарничково-разнотравно-зеленомошные сообщества, в растительном покрове – брусника, злаковые и зеленые мхи *Pleurozium schreberi*, *Polytrichum commune*.

В западинах вывалов формируются особые экологические условия, отличающиеся от участков с ненарушенным растительным покровом. На обнаженных участках сформировались 4 типа микрогруппировок: хвощовая с *Equisetum sylvaticum*, злаковая с *Calamagrostis epigeois* и *Lerchenfeldia flexuosa*, сфагновая с *Sphagnum angustifolium* и политриховая. В моховом ярусе отмечены начальные стадии микросукцессий, для которых характерны *Dicranella heteromalla*, *D. subulata*, *Pogonatum urnigerum*, *Polytrichum commune*. Тип микрогруппировки зависит от местоположения западины: от проточности и освещенности. Экологические условия и отсутствие на данный момент конкуренции с деревьями за минеральное питание позволяют расти видам, характерным для влажных лесов.

Динамика естественного возобновления

Сохранение и восстановление коренных лесов на территориях сплошного ветровала обеспечивается путем непрерывного естественного возобновления. По данным лесоустройства, под пологом еловых древостоев до ветровала имелось от 1,0 до 3,0 тыс. экземпляров жизнеспособного елового подростка.

Обсеменение ветровальных территорий идет от стен леса прилегающих территорий к ветровалу и за счет сохранившихся на корню тонкомерных деревьев с диаметром 6,1–14,0 см (90–230 шт. на 1 га). Также присутствие тонкомерных деревьев сдерживает разрастание травянистой растительности и способствует сохранению лесной среды на ветровальных участках.

По мнению М. Е. Ткаченко, ель начинает плодоносить в насаждении с 30–50-летнего возраста [10]. На исследуемых участках средний возраст тонкомера составляет 70–100 лет. По наблюдениям В. Н. Валяева, периодичность появления елового подростка связана с усиленным выпадением перестойных поколений, достигших возраста естественной спелости. При этом в насаждениях, как указывает исследователь, складываются особенно благоприятные условия для возобновления ели. В последующие десятилетия возобновление идет обычным замедленным темпом [5].

Благоприятные условия почвенного и светового питания создаются на территориях после сплошного ветровала, что способствует увеличению численности подростка. В первые годы после ветровала наблюдается увеличение численности хвойного подростка, а также лиственных пород (табл. 3).

Таблица 3

Динамика естественного возобновления
древесных пород
на участках сплошного ветровала

№ пр. пл.	Тип леса	Год исследования	Количество подростка, шт./га				Итого
			ель	осина	береза	сосна	
2	Ельник брусничный	2002	1950	500	50	–	2500
		2004	2850	3700	1200	50	7800
		2009	2650	2150	300	150	5250
6	Ельник чернично-сфагновый	2002	4260	–	–	–	4260
		2004	6840	5880	–	–	12720
		2009	7245	1495	–	–	8740

По данным учета, в 2002 году в ельнике чернично-сфагновом насчитывалось 4260 экземпляров жизнеспособного елового подростка на 1 га. Распределение подростка по группам высот неравномерное. Здесь преобладал мелкий подрост (высотой до 0,5 м), доля которого составляла 73 % от общей численности елового подростка. Возраст подростка варьировал от 11 до 82 лет. В последующие два года (2002–2004) общая численность подростка увеличилась в 2,9 раза, ели – в 1,6 раза. Через 10 лет после ветровала численность ели возросла на 405 экземпляров, а осины сократилась в 4 раза. Снижение численности подростка осины во 2-м пятилетии после ветровала объясняется повреждением ее лесом.

В ельниках брусничных в год ветровала насчитывалось 1950 экземпляров на 1 га жизнеспособного елового подростка. Здесь же присутствовала примесь лиственных пород – осины и березы. Через 4 года после сплошного ветровала в данном типе леса общая численность подростка увеличилась в 3 раза. Произошло это в основном за счет лиственных пород. Количество елового подростка возросло в 1,5 раза.

Во втором пятилетии наблюдается снижение численности подростка, в основном лиственных пород. Гибель подростка осины и березы произошла из-за повреждения их лесом.

В целом следует отметить, что на участках сплошного ветровала наблюдается непрерывный процесс естественного возобновления. Наличие 2–7 тыс. шт./га жизнеспособного елового подростка и его встречаемости (40 %) позволяет прогнозировать восстановление древостоев с преобладанием ели.

Размещение жизнеспособного елового подростка по площади относительно равномерное. Такое распределение подростка, в свою очередь, обеспечит постоянную относительную равномерность размещения деревьев древостоя.

Наиболее надежным резервом формирования древостоев является крупномерный подрост, количество которого варьирует от 1260 до 2050 шт./га, что вполне достаточно для восстановления лесов с преобладанием ели на участках сплошного ветровала.

Большинство ветровальных стволов находятся на начальной стадии разложения. В настоящее время, то есть через 10 лет после ветровала, зарегистрированы 34 вида грибов. Из них 13 являются индикаторными для старых (9 видов) и девственных (4 вида) лесов: *Amylocystis lapponica*, *Chaetoderma luna*, *Dichomytus squalens*, *Fomitopsis rosea*, *Onnia leporina*, *Phellinus chrysoloma*, *Phellinus ferrugineofuscus*, *Ph. lundellii*, *Phellinus nigrolimitatus*, *Ph. viticola*, *Phlebia centrifuga*, *Phlebia cornea*, *Pycnoporellus fulgens*. Вид *Dichomytus squalens* внесен в Красную книгу Республики Карелия.

Отмечено преобладание видов грибов-пионеров: *Coniophora arida*, *C. olivacea*, *Fomes fomentarius*, *Fomitopsis pinicola*, *Gloeophyllum sepiarium*, *Phellinus chrysoloma*, *Trichaptum abietinum*.

ВЫВОДЫ

1. В первые годы после ветровала на ВК отбор растений, способных к произрастанию на

обнаженной почве, идет под влиянием таких факторов, как влажность почвы, освещенность, трофность местообитания. Флористический состав на ВК практически не меняется, биоразнообразие напочвенного покрова возрастает за счет пионерных видов зеленых мхов, предпочитающих нарушенные почвы.

2. Во всех микросукцессиях мхов на обнаженной почве сохраняются общие закономерности. Начальные стадии характеризуются появлением видов зеленых мхов, в первую очередь представителей родов *Dicranella* и *Polytrichum*.

3. В течение первых 4 лет после ветровала наблюдается увеличение численности хвойного подроста, особенно лиственных пород. Через 10 лет насчитывается от 2 до 7 тыс. экз. на 1 га елового подроста, в том числе крупномерного – 1,2–2,0 тыс. экз./га, что позволяет прогнозировать восстановление лесов с преобладанием ели на участках сплошного ветровала.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ананьев В. А., Грабовик С. И. Структура и формирование растительного покрова в ненарушенных ельниках и после сплошного ветровала // Труды Карельского научного центра РАН. 2008. Вып. 12. Сер. «Биогеография». С. 9–13.
2. Ананьев В. А., Раевский Б. В. Характеристика лесов национального парка «Водлозерский» // Национальный парк «Водлозерский»: Природное разнообразие и культурное наследие. Петрозаводск: КНЦ РАН, 2001. С. 111–116.
3. Ананьев В. А., Раевский Б. В., Грабовик С. И. Организация лесного мониторинга в коренных еловых лесах национального парка «Водлозерский» // Национальный парк «Водлозерский»: Природное разнообразие и культурное наследие. Петрозаводск: КНЦ РАН, 2001. С. 117–122.
4. Ананьев В. А., Раевский Б. В., Грабовик С. И. Коренные еловые леса НП «Водлозерский»: структура, динамика и состояние // Водлозерские чтения: естественные и гуманитарные основы природоохранной, научной и просветительской деятельности на охраняемых природных территориях Русского Севера: Материалы науч.-практ. конф., посвящ. 15-летию НП «Водлозерский». Петрозаводск, 2006. С. 88–93.
5. Валяев В. Н. Динамика таксационных показателей разновозрастных еловых насаждений // Лесной журнал. 1963. № 4. С. 22–26.
6. Программа и методика биогеоценологических исследований. М.: Наука, 1966. 366 с.
7. Пукинская М. Ю. К восстановлению еловых древостоев на участках ветровальных окон // Ботанический журнал. 2006. Т. 91. С. 879–891.
8. Сибгатуллин Р. З. Динамика пихто-ельника высокотравно-папоротникового после природных нарушений в Висимском заповеднике // Многолетняя динамика популяций животных и растений на ООПТ и сопредельных территориях по материалам стационарных и тематических наблюдений: Материалы юбилейной науч. конф., посвящ. 60-летию Дарвиновского государственного природного биосферного заповедника. Череповец, 2005. С. 105–107.
9. Скворцова Е. Б., Уланова Н. Г., Басевич В. Ф. Экологическая роль ветровалов. М.: Лесн. пром-сть, 1983. 192 с.
10. Ткаченко М. Е. Общее лесоводство. М.; Л.: Гослесбумиздат, 1952. 600 с.
11. Уланова Н. Г. Сравнительный анализ динамики растительности разновозрастного ельника-кисличника, массового ветровала и сплошной вырубki в том же типе леса // Бюлл. Московского общества испытателей природы. Отд. общей биологии. 2004. Т. 109. Вып. 6. С. 64–72.

ОЛЬГА ИВАНОВНА ГАВРИЛОВА

кандидат сельскохозяйственных наук, доцент кафедры
лесного хозяйства лесоинженерного факультета, Петрозаводский государственный университет
ogavril@petrsu.ru

ЭЛЬМИНА АЛЕКСЕЕВНА ЛЕОНТЬЕВА

студентка 4-го курса факультета почвоведения, агрохимии и экологии, Российский государственный аграрный университет – Московская сельскохозяйственная академия им. К. А. Тимирязева
khlustov@timacad.ru

О СООТНОШЕНИИ СРЕДНИХ ВЫСОТ КУЛЬТУР СОСНЫ И ПРИМЕСИ БЕРЕЗЫ НА ВЫРУБКАХ КАРЕЛИИ

В статье рассматриваются вопросы роста лесных культур сосны обыкновенной, созданных после сплошных рубок лесов черничного и брусничного типа на территории Прионежского, Олонецкого, Питкярантского и Пряжинского центральных лесничеств. Предложены модели средних высот для разных классов бонитета, рассмотрено их соотношение с высотами лиственных пород для брусничного и черничного типов условий произрастания.

Ключевые слова: искусственное лесовосстановление, сосна обыкновенная, рост культур, осина, береза бородавчатая, вырубка

В лесах Республики Карелия в течение длительного времени применялась выборочная форма ведения хозяйства, ориентированная на использование древесины сосны. В результате сосновые леса сменились еловыми и елово-березовыми насаждениями [4]. После перехода на сплошные концентрированные рубки положение усугубилось появлением в наиболее продуктивных лесорастительных условиях вегетативного потомства лиственных пород. По мнению многих лесоводов, смена сосны елью и лиственными породами с лесоводственной и экономической точек зрения нецелесообразна [1], [5]. В результате пожаров, уничтожавших подрост хвойных пород, резко возросли площади чистых березняков и осинников [2]. В условиях экономического кризиса, при нехватке средств, выделяемых на создание культур, неразвитой инфраструктуре и низком уровне ведения хозяйства в целом достаточно сложно проводить качественные ухода для получения молодняков с преобладанием хвойных пород.

Актуальность темы исследований связана с тем, что окончательно не решен вопрос о необходимости создания искусственных насаждений. Некоторые исследователи предполагают, что смена хвойных пород лиственными является необходимостью для обогащения почвы, как севообороты в сельском хозяйстве, для повышения естественного плодородия. Классики лесоводства, однако, доказали, что примеси лиственных пород в количестве 20 % состава достаточно для поддержания необходимого уровня минерального питания насаждения [3]. Тем не менее до сих пор неясно, что происходит с искусственно созданной сосной, которая является весьма светолюбивой породой, при отсутствии своевременных ухода за составом. Успешное решение

задач, связанных с целенаправленным выращиванием искусственных древостоев с заданными лесоводственно-эксплуатационными параметрами, требует выявления целого ряда закономерностей их естественного формирования. После проведения рубок главного пользования на площадях, отведенных под лесные культуры, создаются благоприятные условия для появления на обработанной почве самосева сопутствующих древесных пород и поросли. Как правило, они являются главным конкурентом культур за свет и почвенное питание. Организация лесного насаждения как биогеосистемы выражена во взаимосвязи и взаимодействии образующих его компонентов. Этот процесс начинается после смыкания насаждения, здесь конкурентные отношения регулируют процессы роста и развития лесного сообщества.

Целью исследований являлось выявление закономерностей роста культур сосны, созданных после сплошных рубок лесов черничного и брусничного типа, в конкурентных отношениях с лиственными породами. Взаимоотношения сосны и березы в разных типах лесорастительных условий различны, поэтому и рекомендации по рубкам ухода будут отличаться. Основным условием закладки пробных площадей было отсутствие ухода за культурами как минимум в течение последних 20 лет.

Методика исследований предполагала закладку пробных площадей в лесных культурах разного возраста. Пробные площади закладывали в пределах одной группы типов леса в разновозрастных древостоях сосновой формации. Число деревьев на пробных площадях соответствовало требованиям ОСТ 56-69-83 «Пробные площади лесоустроительные. Метод закладки». Проводились замер диаметров не менее чем у

300 деревьев на пробе, сплошное измерение высот культур в возрасте до 20 лет и 10 % высот культур старше 20 лет для разных ступеней толщины. Тип условий произрастания до момента рубки устанавливали по архивным данным. Кроме того, методика исследований предполагала, что к возрасту исследований сформировались сосновые культуры с примесью лиственных не более 7 единиц в составе. При полном отсутствии рубок ухода в молодняках по относительно богатым типам условий произрастания береза заглушает сосну, что нередко ведет к полной гибели культур сосны. Береза как более конкурентоспособная порода обладает быстрым ростом в возрасте до 10 лет и может сформировать мелколиственное насаждение на вырубке. Такие насаждения с полной гибелью культур сосны нами не рассматривались.

Результаты исследований. Собранный материал, полученный на площадях производственных лесных культур, подтверждался материалами лесоустройства и был проанализирован с применением методов статистического анализа. Выявлялись закономерности изменения средних показателей роста культур в возрасте от 25 до 65 лет. Объектом исследований служили древостои, произрастающие в черничных и брусничных типах леса. Они составляют большую часть лесокультурного фонда южной части республики (примерно 73 %). Исторические данные о лесокультурном производстве свидетельствуют о том, что лесные культуры старших возрастов (более 25–30 лет) создавались исключительно посевом семян по обработанной почве (рис. 1). Густота посадки и норма высева семян неизвестны. Лесные культуры, имеющие в настоящее время возраст 5–25 лет, закладывались по обработанной почве посадкой семян густотой 3,5–4 тыс. шт./га.



Рис. 1. Лесные культуры сосны обыкновенной, созданные посевом семян по обработанной почве вырубки после сосняка черничного (Машезерское участковое лесничество Прионежского центрального лесничества)

Применение статистических методов моделирования роста культур с использованием данных пробных площадей и таксационных выделов позволило получить уравнение регрессии возрастной динамики средней высоты (H) по классам бонитета (B) (рис. 2):

$$H = \exp(-3,44992 - 0,74965 \ln B + 2,61799 \ln A - 0,22791 \ln^2 A); \quad (1)$$

$$R^2 = 0,930; \quad F = 58,2; \quad t > t_{0,5} = 2;$$

$$\lim B = \text{II–IV}; \quad \lim A = 5\text{–}60 \text{ лет.}$$

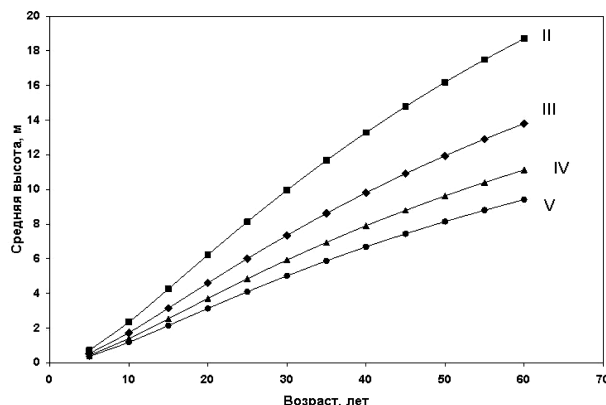


Рис. 2. Изменение средней высоты древостоя культур сосны по классам бонитета (II–V)

Естественное возобновление лиственных пород оказывает негативное воздействие на формирование культур сосны. О степени доминирования этих пород над культурами сосны в вертикальной структуре полога можно судить по уравнениям регрессии соотношения их средних высот.

Аналитически закономерность взаимосвязи средней высоты березы (H_B) и высоты культур сосны (H_C) для черничного типа леса можно представить уравнением регрессии вида:

$$H_B = 1,8187 H_C^{0,7561}; \quad R^2 = 0,905. \quad (2)$$

При прямой редукции высот культур сосны закономерность роста березы носит криволинейный характер и пересекает прямую редукции при высоте культур, равной 12 м (рис. 3). Это значит, что до достижения культурами сосны средней высоты 12 м средняя высота березы в насаждении превышает это значение. После отметки 12 м для средней высоты береза начинает отставать по высоте от культур сосны. Это связано с тем, что береза в возрасте 50–60 лет достигает возраста спелости, в то время как сосна продолжает период активного роста и находится на средневозрастном этапе. Таким образом, в черничном типе леса после достижения 12-метровой отметки сосна начинает превышать березу по высоте.

Аналогичная зависимость средних высот сосны и естественной примеси березы и осины наблюдается в брусничном типе леса.

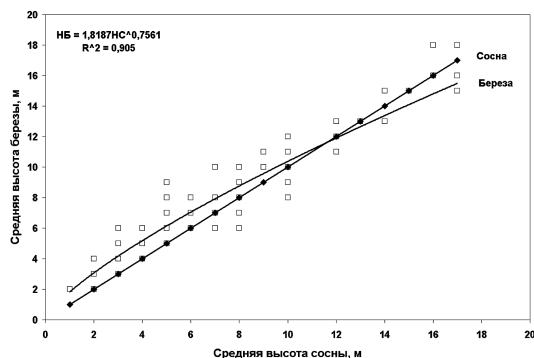


Рис. 3. Сопоставление средних высот древостоя лесных культур сосны со средними высотами примеси березы естественного происхождения в черничном типе леса

Превышение средних высот лиственных пород над культурами сосны описано регрессией вида:

$$H_B = 1,5573H_C^{0,786}, R^2 = 0,898. \quad (3)$$

В брусничном типе леса при средней высоте сосны 8 м она начинает превышать березу (рис. 4). Здесь превышение сосны по высоте относительно березы происходит при меньших высотах, что связано с более благоприятными для сосны условиями произрастания.

Таким образом, отсутствие интенсивных уходов в первые 10–20 лет жизни сосновых культур может привести к полной их гибели. При проведении рубок ухода в молодняках после форми-

рования сосново-лиственного насаждения (20–50 лет) возникают определенные закономерности их развития.

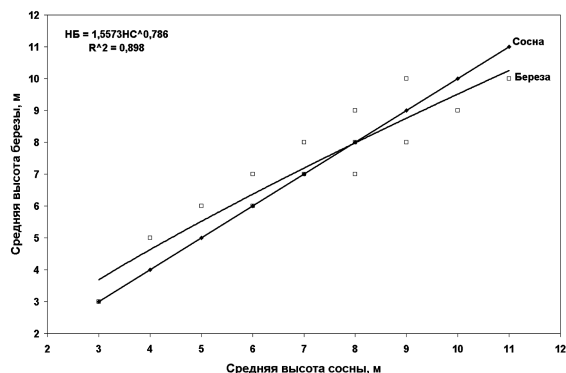


Рис. 4. Сопоставление средних высот древостоя лесных культур сосны со средними высотами примеси березы естественного происхождения в брусничном типе леса

Естественное возобновление березы превышает по высоте культуры сосны до достижения ими в среднем 12 м высоты по черничному и 8 м – по брусничному типу леса. После этого средняя высота культуры сосны превышает высоту естественного возобновления, поэтому создание лесных культур при условии проведения осветления в молодняках позволяет сохранить преобладание хвойных пород на площади вырубки до возраста приспевания древостоя.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Валяев В. Н. Выборочные и сплошнолесосечные рубки в Карелии (сравнительная продуктивность хозяйства). 2-е изд. Петрозаводск: Карелия, 1989. 102 с.
2. Волков А. Д. Биоэкологические основы эксплуатации ельников северо-запада таежной зоны России. Петрозаводск: Карельский научный центр РАН, 2003. 205 с.
3. Маслаков Е. Д. Формирование сосновых молодняков. М.: Лесн. пром-сть, 1984. 168 с.
4. Морозов Г. Ф. Очерки по лесокультурному делу. М.; Л.: Гослесбумиздат, 1950. 235 с.
5. Соколов А. И. Лесовосстановление на вырубках Северо-Запада. Петрозаводск: Карельский научный центр РАН, 2006. 215 с.
6. Чибисов Г. А., Гущин В. А. Лесоводственно-экономическая оценка смены сосны елью // Лесоводственно-экономические вопросы воспроизводства лесных ресурсов Европейского Севера. Архангельск, 2000. С. 137–145.

АЛЕКСАНДРА АНДРЕЕВНА ЕРКОЕВАмладший научный сотрудник Института биологии, Карельский научный центр РАН
erkoeva@mail.ru**ЕКАТЕРИНА СТАНИСЛАВОВНА ХОЛОПЦЕВА**кандидат биологических наук, старший научный сотрудник Института биологии, Карельский научный центр РАН
holoptseva@krc.karelia.ru**СТАНИСЛАВ НИКОЛАЕВИЧ ДРОЗДОВ**доктор биологических наук, профессор, главный научный сотрудник Института биологии, Карельский научный центр РАН
drozdov@krc.karelia.ru

НЕКОТОРЫЕ АСПЕКТЫ СВЕТО-ТЕМПЕРАТУРНОЙ ХАРАКТЕРИСТИКИ СЕЯНЦЕВ СОСНЫ ОБЫКНОВЕННОЙ ВОСТОЧНОЙ ФЕННОСКАНДИИ

Исследовали эколого-физиологические характеристики интактных сеянцев сосны обыкновенной (*Pinus sylvestris* L.) разного географического происхождения по влиянию свето-температурных факторов среды на CO_2 -обмен растений. Показано, что их свето-температурная характеристика значительно варьирует: с продвижением на юг границы светового оптимума смещаются в сторону более низкой освещенности, а нижняя граница температурного – в сторону повышенных значений.

Ключевые слова: сеянцы сосны обыкновенной (*Pinus sylvestris*), CO_2 -обмен интактных растений, свето-температурные характеристики, оптимум и максимум нетто-фотосинтеза

Сосна обыкновенная (*Pinus sylvestris* L.) благодаря своим многочисленным разновидностям в Евразии занимает полосу, которая проходит от северной Шотландии и Норвегии через всю европейскую бореальную зону до Тихого океана [20]. Она резко отличается от других хвойных и лиственных пород европейской части России своей способностью формировать древостой на бедных песчаных почвах и в условиях олиготрофного ряда заболачивания. Сосна обыкновенная образует границу леса в Фенноскандии, а вместе с елью – на Кольском полуострове [9], [13]. В Карелии большую часть покрытой лесом площади занимают сосняки (64 %), произрастающие в самых различных экологических условиях в пределах ареала, что свидетельствует о большом резерве ее внутривидовой изменчивости. Последнее подтвердили ранее проведенные исследования ряда генетических структур и фенотипических признаков [23], [25]. Их изменение наиболее заметно происходит с севера на юг вслед за фотопериодом и другими макроклиматическими параметрами [8], [9], [19], [22]. Дальнейшее изучение характеристики внутривидовой изменчивости этого уникального вида необходимо при проведении селекционной работы, разработке агротехники выращивания, особенно саженцев в защищенном грунте. Большой интерес представляют прогнозирование возможных смещений границ ареала в связи с изменением климата [21], а также разработка методов поддержания стабильности и сохранения биоразнообразия лесных экосистем в регионе [5], [7].

© Еркеева А. А., Холопцева Е. С., Дроздов С. Н., 2011

В связи с расширением масштабов искусственного лесовозобновления особое значение приобретает экофизиологическая характеристика экотипов сосны на ранних фазах ее развития. Одним из методов изучения экологической характеристики растений на конкретной фазе их развития является определение интенсивности ведущих факторов внешней среды, обеспечивающих заданный уровень, в том числе потенциальный, одного из основополагающих физиологических процессов, чутко реагирующего на условия среды. Так как в естественных условиях сочетание интенсивности факторов, обеспечивающее проявление потенциального максимума любого биологического процесса, бывает крайне редко, комфортными (оптимальными) условиями среды для конкретного генотипа растения являются условия ее фоновой зоны [3], [11]. Физиологическим процессом, отвечающим указанным требованиям, является CO_2 -обмен интактных растений, который хорошо дистанционно контролируется и чутко реагирует на изменение основных факторов внешней среды. Специалистами ведущая роль в формировании древесных насаждений отводится свету [1], [15], [16], а температуре, тесно связанной с ним в природе, уделяется значительно меньше внимания. Возможность управления факторами среды в фитотроне позволяет использовать методики измерений, основанные на системном подходе, с планированием экспериментов [2], [10].

Задачей данной работы было изучение свето-температурной характеристики сеянцев сосны обыкновенной путем определения параметров

света и температуры, обеспечивающих достижение потенциального максимума и зоны оптимума их видимого фотосинтеза.

Исследования проводили с сеянцами сосны обыкновенной (*Pinus sylvestris*) разного географического происхождения (табл. 1). Перед посевом семена помещали на 3 часа в 0,05 % раствор перманганата калия, затем просушивали до воздушно-сухого состояния в течение суток и высевали в пластиковые сосуды объемом 0,5 л по 20–30 шт. в каждый. Растения выращивали в песчаной культуре при факторостатном режиме: фотопериод – 14 ч, освещенность – 100–120 Вт/м², температура воздуха – 25/20 °С (день / ночь), учитывая кислотность почвы в естественных условиях прорастания семян [12]. Полив проводили ежедневно питательным раствором Кнопа с добавлением микроэлементов при pH 4,5 до его протекания в поддон. По достижении сеянцами двухмесячного возраста удаляли нетипичные всходы. Далее по три сосуда с растениями, не имеющими внешних повреждений или отклонений в росте, помещали в установку для исследования CO₂-газообмена открытого типа [10] с газоанализатором Infralyt-IV (Германия) и осветительным блоком ламп, со спектром излучения, близким к естественному. Интенсивность газообмена определяли при концентрации CO₂ в воздухе, близкой к естественной, по разности содержания углекислого газа в воздухе на входе и выходе воздушного потока установки по 7-точечному плану (табл. 2, 3). Экспозиция ступени плана – 40–60 мин [18], время выполнения одной повторности – 8 ч. Интенсивность газообмена рассчитывали на единицу сухой массы растения (табл. 4).

Таблица 1
Региональное и географическое место сбора семян сосны обыкновенной

№ п/п	Место сбора семян / регион	С. ш.	В. д.	Природная зона
1	Ковдозеро / Мурманская область	66°45'40"	31°33'39"	Лесотундра
2	Юшкозеро / Карелия	64°44'01"	32°05'53"	Северная тайга
3	Поросозеро / Карелия	62°43'05"	32°45'37"	Средняя тайга

Обработка экспериментальных данных методом множественного регрессионного анализа, с использованием программ Statgraphic, Statistica, позволила получить уравнения-модели взаимосвязи видимого фотосинтеза интактных растений сосны обыкновенной с температурой и освещенностью:

$$P_n = a_0 + a_1T + a_2E + a_3T^2 + a_4E + a_5E^2,$$

где P_n – интенсивность нетто-фотосинтеза (мгСО₂/г · ч); E – освещенность, Вт/м²; T – температура, °С; a_0 – a_5 – численные коэффициенты; коэффициент множественной детерминации модели – не менее 0,8.

Таблица 2

План двухфакторного эксперимента

№ блока эксперимента	Кодировка / натуральные значения	Место сбора семян					
		Ковдозеро		Юшкозеро		Поросозеро	
		T, °С	E, Вт/м ²	T, °С	E, Вт/м ²	T, °С	E, Вт/м ²
I блок	-1	5	100	5	100	7	100
	0	15	200	15	200	20	200
	1	25	300	25	400	30	300
II блок	-1	10	100	10	100	10	100
	0	20	250	20	200	25	350
	1	35	500	35	300	35	500

Таблица 3

Экспериментальные значения нетто-фотосинтеза интактных сеянцев сосны обыкновенной

№ блока эксперимента	План эксперимента		Нетто-фотосинтез, мгСО ₂ /г · ч		
	T, °С	E, Вт/м ²	Ковдозеро	Юшкозеро	Поросозеро
I блок	-1	-1	0,9	0,3	0,68
	1	-1	2,997	2,74	1,95
	-1	1	2,28	2,03	1,61
	1	1	1,8	0,6	0,41
	1	0	4,143	3,83	1,67
	0	1	3,7	3,2	2,57
	0	0	1,675	2,1	1,34
	0	-1	1,9	3,33	2,24
II блок	-1	-1	2,116	0,8	1,01
	1	-1	3,8	3,28	1,15
	-1	1	0	0,04	0,6
	1	1	1,1	2,3	0,1
	1	0	3,9	3,73	1,2
	0	1	2,3	1,05	0,71
	0	0	3,173	2,7	2,21
	0	-1	2,116	2,58	2,22

Анализ модели численными методами показал, что потенциальный максимум нетто-фотосинтеза всходов сосны обыкновенной разного географического происхождения у исследуемых экотипов значительно различается. Наибольших значений он достигает при pH среды 4,5 у всходов семян, собранных в Юшкозерском лесхозе, – 4,08 мгСО₂/г · ч, наименьшие значения зафиксированы в Поросозерском лесхозе – 2,7 мгСО₂/г · ч. Сеянцы заметно различались и по экологическим параметрам. Наиболее светлюбивы всходы северного происхождения, зона их оптимальной освещенности находится в диапазоне 290–570 Вт/м². Значительно менее светлюбивы всходы более южного происхождения, но они теплолюбивее.

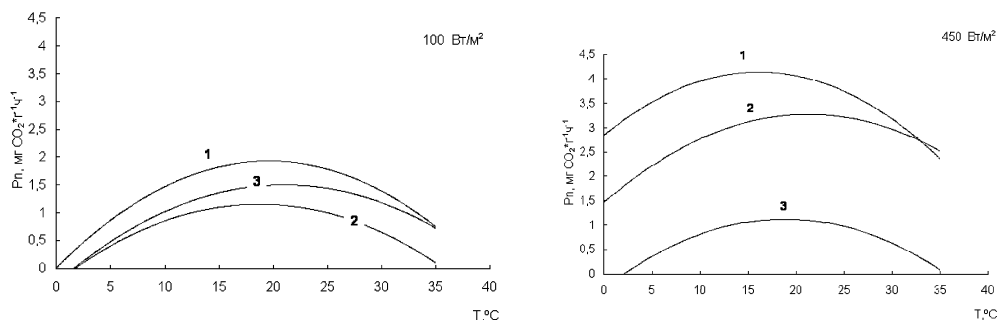


Рис. 1. Влияние температуры на нетто-фотосинтез интактных растений сосны обыкновенной при различных уровнях освещенности. Место сбора семян: 1 – Ковдозеро, 2 – Юшкозеро, 3 – Поросозеро

Графическое изображение влияния температуры на нетто-фотосинтез всходов исследуемых экотипов сосны при различном уровне освещенности показывает, что температурные кривые имеют плосковершинный характер при всех уровнях освещенности, что свидетельствует о ее относительно слабом влиянии на фотосинтез (рис. 1). С повышением температуры воздуха до 14–19 °С в зависимости от уровня освещенности видимый фотосинтез увеличивается, достигая максимальной величины с последующим снижением при возрастании температуры. При этом влияние температуры на нетто-фотосинтез зависит как от интенсивности освещенности, так и от географического происхождения семян, положения границы их фоновой зоны. Поэтому у семян, выращенных из семян, собранных в районах Ковдозеро и Юшкозеро, нетто-фотосинтез при 450 Вт/м² увеличивается, а у растений, выращенных из семян района Поросозеро, при увеличенной освещенности остается почти на прежнем уровне, так как освещенность 450 Вт/м² приближается и, возможно, выходит за его верхнюю границу оптимума (табл. 4). Повышение температуры за пределы фоновой зоны ведет к снижению нетто-фотосинтеза во всех вариантах, в основном за счет усиления составляющей дыхания поддержания в зоне ее закаливающего влияния [4], [14].

Таблица 4

Потенциальный максимум и оптимум нетто-фотосинтеза интактных растений сосны обыкновенной в фазу всходов и свето-температурные условия внешней среды, обеспечивающие их достижение при естественном содержании в воздухе CO_2 и $\text{pH} = 4,5$

Место сбора семян	Нетто-фотосинтез (мг $\text{CO}_2/\text{г} \cdot \text{ч}$)		Условия среды, обеспечивающие достижение нетто-фотосинтеза			
	max	opt	потенциального максимума*		оптимума**	
			Вт/м²	°С	Вт/м²	°С
Ковдозеро	3,86	3,48	430	14	290–570	6–24
Юшкозеро	4,08	3,69	350	19	240–480	9–28
Поросозеро	2,7	2,5	360	16	230–460	10–25

* – интенсивность освещенности и температуры, обеспечивающих достижение потенциального максимума при естественном уровне сопутствующих факторов внешней среды.

** – диапазон интенсивности освещенности и температуры – фоновая зона, обеспечивающая достижение 90 % нетто-фотосинтеза от его потенциального максимума.

Графическое изображение влияния света на нетто-фотосинтез семян сосны при разной температуре показало, судя по наклону кривых, более сильное его воздействие на фотосинтез, чем температуры (рис. 2). С повышением освещенности до 350–430 Вт/м² в зависимости от температуры и географического происхождения семян сосны скорость их видимого фотосинтеза возрастает.

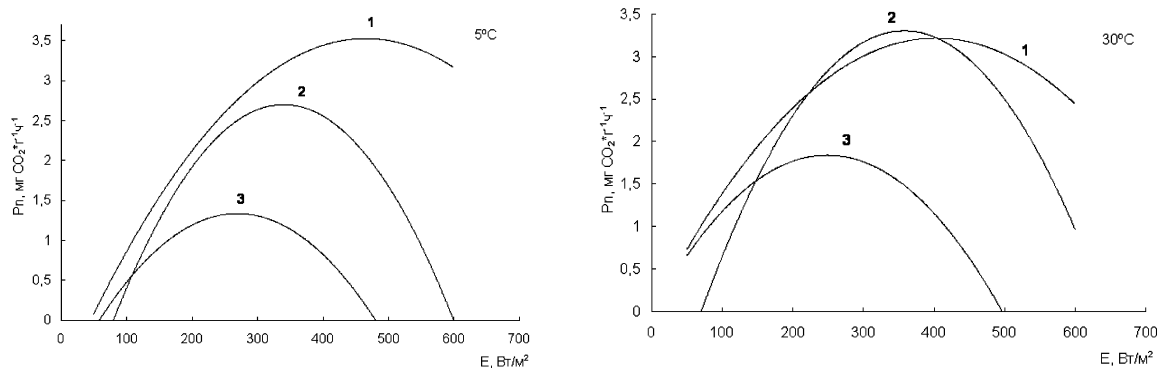


Рис. 2. Влияние освещенности на нетто-фотосинтез интактных растений сосны обыкновенной при различных температурах. Место сбора семян: 1 – Ковдозеро, 2 – Юшкозеро, 3 – Поросозеро

Дальнейшее увеличение освещенности ведет к ее снижению в связи с дисбалансом световой и темновой фаз фотосинтеза [6], [17]. При этом саженцы разного географического происхождения значительно различаются по их реакции на интенсивность освещенности. Судя по наклону кривых, сила влияния освещенности на нетто-фотосинтез значительно меньше у сеянцев более северного происхождения, особенно в области повышенной освещенности, в широком температурном диапазоне.

Имеющиеся литературные данные о влиянии ведущих факторов внешней среды на нетто-фотосинтез сосны обыкновенной, полученные в естественных условиях среды, свидетельствуют об их значительном варьировании в зависимости от места и времени проведения исследований [1], [15], [23].

Характер изменений CO_2 -обмена по исследуемым параметрам и свидетельствует о наличии

у сосны обыкновенной внутривидового экологического разнообразия, которое необходимо учитывать как в селекционной работе, так и при разработке режимов выращивания посадочного материала.

Потенциальный максимум видимого фотосинтеза у трех исследуемых образцов интактных сеянцев сосны обыкновенной Восточной Финляндии при рН среды 4,5 находится в диапазоне 1,49–2,90 $\text{мгCO}_2/\text{г} \cdot \text{ч}$ и достигается в зависимости от места происхождения при температурах от 14 до 19 °С и освещенности от 350 до 430 Вт/м^2 . Полученные при проведении планируемых многофакторных экспериментов светотемпературные зависимости CO_2 -обмена можно считать эколого-физиологическими характеристиками сеянцев разного географического происхождения на исследуемой фазе их развития.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Болондинский В. К. Динамика CO_2 -газообмена побегов сосны обыкновенной в условиях среднетаежной зоны: Автореф. дис. ... канд. биол. наук. Петрозаводск, 2004. 28 с.
2. Голикова Г. И., Панченко Л. А., Фридман М. З. Каталог планов второго порядка. Вып. 47. Ч. 1. М.: МГУ, 1974. 387 с.
3. Дроздов С. Н., Курец В. К. Некоторые аспекты экологической физиологии растений. Петрозаводск: Изд-во ПетрГУ, 2003. 170 с.
4. Дроздов С. Н., Сычева З. Ф., Попов Э. Г., Таланов А. В., Холопцева Е. С., Курец В. К. Роль дыхания в формировании терморезистентности растений // Физиология и биохимия растений. 2005. Т. 37. № 1. С. 73–78.
5. Ильинов А. А., Раевский Б. Р. Внутривидовое разнообразие сосны и ели // Разнообразие биоты Карелии: условия формирования, сообщества, виды. Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2003. С. 91–97.
6. Кислюк И. М. Функциональные и структурные изменения в клетках листьев теплолюбивых растений при действии низких положительных температур на свету и в темноте // Биофизика. 1964. 9.4. С. 463–469.
7. Кищенко И. Т. Рост и развитие аборигенных и интродуцентных видов семейства Pinaceae Lindl. в условиях Карелии. Петрозаводск: Изд-во ПетрГУ, 2000. 211 с.
8. Козубов Г. М. Внутривидовое разнообразие сосны обыкновенной (*Pinus sylvestris* L.) в Карелии и на Кольском полуострове: Автореф. дис. ... канд. биол. наук. Петрозаводск, 1962. 16 с.
9. Куллерво К. Динамика бореальных хвойных лесов. Ювяскя; Репол, 1991. 210 с.
10. Курец В. К., Попов Э. Г. Статистическое моделирование связей растение – среда. Л.: Наука, 1991. 152 с.
11. Лархер В. Экология растений. М.: Мир, 1978. 280 с.
12. Морозова Р. М., Федоренко Н. Г. Современные процессы почвообразования в хвойных лесах Карелии. Петрозаводск: КарНЦ РАН, 1992. 281 с.
13. Орлов А. Я., Кошельков С. П. Почвенная экология сосны. М.: Наука, 1971. 322 с.
14. Попов Э. Г., Курец В. К., Дроздов С. Н., Таланов А. В. Влияние температуры на составляющие дыхания (на примере огурца) // Тез. докл. на конф. «Карелия и РФФИ». Петрозаводск, 2002. С. 39.
15. Суворова Г. Г. Фотосинтез хвойных в условиях Сибири. Новосибирск: Академическое изд-во «Гео», 2009. 195 с.
16. Цельникер Ю. Л. Физиологические основы теневыносливости древесных растений. М.: Наука, 1978. 214 с.
17. Цельникер Ю. Л. Функциональная и структурная организация фотосинтетического аппарата лесных древесных растений // Труды Всесоюзного совещания «Эколого-физиологические исследования фотосинтеза и водного режима растений в полевых условиях». Иркутск, 1983. С. 5–15.
18. Цельникер Ю. Л., Малкина И. С., Ковалев А. Г., Чмора С. Н., Мамаев В. В., Молчанов А. Г. Рост и газообмен CO_2 у лесных деревьев. М.: Наука, 1993. 256 с.
19. Щербатюк А. С., Каплин В. М., Янькова Л. С., Русакова Л. В. Фотосинтетический и дыхательный газообмен хвойных // Труды Всесоюзного совещания «Эколого-физиологические исследования фотосинтеза и водного режима растений в полевых условиях». Иркутск, 1983. С. 37–44.
20. Янбаев Ю. А., Тренин В. В., Шигапов З. Х., Бактиерова Р. М. Генетическая изменчивость и дифференциация сосны обыкновенной (*Pinus sylvestris* L.) на территории Карелии // Научные основы селекции древесных растений Севера. Петрозаводск, 1998. С. 25–32.
21. Andersson F. Ecosystem of the world: Coniferous forests. Elsevier. 2005. 633 p.
22. Mattiñes Vilalta J., Lopez B. C., Adell N., Badiella A. Twentieth century increases of Scots pine radial growth in NE Spain swos strong climate interaction // Global change biology. 2008. Vol. 14. P. 2868–2881.
23. Mellander P.-E., Bishop K., Lundmark T. The influence of soil temperature on transpiration: a plot scale manipulation in a young Scots pine stand // Forest Ecol. Manage. 2008. Vol. 195. P. 15–28.
24. Oleksyn J., Reich P. B., Zytkowski R., Karolewski P., Tjoelker M. G. Nutrient conservation increases with latitude of origin in European *Pinus sylvestris* populations // Oecologia. 2003. P. 220–235.
25. Oleksyn J., Reich P. B., Zytkowski R., Tjoelker M. G., Karolewski P. Needle nutrients in geographically diverse *Pinus sylvestris* population // Ann For Sci. 2002. Vol. 59. P. 1–18.

ЕВГЕНИЙ АЛЕКСАНДРОВИЧ ПИТУХИН

доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой математического моделирования систем управления математического факультета, Петрозаводский государственный университет
eugene@petrsu.ru

ПАВЕЛ СЕРГЕЕВИЧ ЧИКУЛАЕВ

кандидат технических наук, директор ООО «Эко-Окна»
chikulaev@sampo.ru

МОДЕЛИРОВАНИЕ ОБЪЕМА ПИЛОМАТЕРИАЛОВ С УЧЕТОМ СБЕГОВОЙ ЗОНЫ СТВОЛА

В статье рассмотрены несколько видов сечений заготовок, используемых для склейки столярных щитов и включающих в себя сбеговую зону бревна; приведены формулы для расчета объемов этих заготовок. С помощью методов имитационного моделирования найдены оптимальные геометрические параметры заготовок с точки зрения получения максимального объемного выхода пилопродукции.

Ключевые слова: сбеговая зона, вершинный диаметр, объем пиломатериалов, древесные отходы, заготовки для склейки, деревянный щит, имитационное моделирование, оптимизация

Анализ структуры лесопиления в России показывает, что доля отходов достигает 45 % [6], поскольку неизменной остается геометрия раскроя бревна. Только около четверти этих отходов используется как вторичное сырье для производства различных видов продукции, чаще всего технологической щепы. Другие направления использования отходов мало распространены из-за высокой стоимости оборудования и зачастую высоких требований к сырью. Например, производство топливных брикетов или гранул требует опилок с влажностью не более 12 %, однако сушильными камерами обладают далеко не все лесозаводы. Из оставшихся на выходе 55 % полезной пилопродукции часть отбраковывается из-за пороков древесины или по причине технического брака. Бревна малых диаметров (12–14 см) из-за низкого выхода пиломатериалов традиционного сечения пока еще не находят должного применения в лесопилении. По этой причине стоимость кубометра тонкомерных бревен в 1,5–2 раза ниже, что делает их потенциально привлекательными для переработки.

Одним из путей повышения объемного выхода продукции является снижение потерь древесного сырья за счет использования так называемой сбеговой зоны бревна. Под сбеговой зоной понимается боковая часть бревна, при продольном раскрое которой длина полученных пиломатериалов меньше длины исходного бревна. (Пиломатериалы, имеющие длину исходного бревна, получают из так называемой пифагорической зоны.) Возможны два основных направления использования древесины из сбеговой зоны: непосредственная выработка деталей

из отходов или рациональный выбор сечений пиломатериалов. Полезный выход при первом способе составляет всего 20–30 % от объема отходов на входе при значительных материальных затратах [4].

В этой связи большой интерес представляет использование сырья, полученного вторым способом, для дальнейшей переработки на клееные щитовые заготовки различных габаритов. Рассмотренные далее заготовки позволят повысить объем полезной продукции предприятий, занимающихся производством клееных конструкций. При рассмотрении прочностных характеристик этих конструкций было выявлено, что они не уступают соответствующим характеристикам цельной древесины и зачастую их превосходят. При этом по удельной прочности (отношению прочности к удельному весу) клееная древесина не уступает стали [8].

На рис. 1 представлена принципиальная схема формирования клееных щитов из заготовок различной формы. Данные заготовки получают обрезкой необрезных досок вдоль их кромок, поэтому на виде сверху они имеют форму трапеции. При склейке в щит заготовки складываются попеременно вершинными и комлевыми торцами, чтобы компенсировать сбеги. Под сбегом понимается изменение диаметра бревна (в сантиметрах), приходящееся на 1 м его длины.

Целью статьи является оценка возможного прироста полезного выхода пилопродукции при переходе на нетрадиционные сечения и разработка моделей, позволяющих производителю определить оптимальные параметры заготовок для своих условий. Для достижения данной цели

предлагается провести имитационное моделирование [2] объемов заготовок различных форм, что позволит заранее оценить результат применения той или иной технологии в процессе реального производства заготовок из бревен.

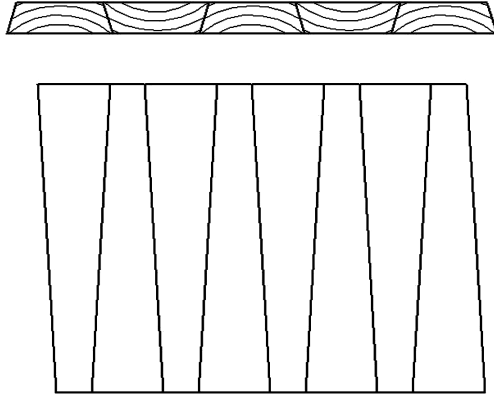


Рис. 1. Схема склейки трапециевидных заготовок

На основе результатов проведенного вычислительного эксперимента, с учетом сформированных количественных и качественных требований к характеристикам заготовок могут быть сделаны общие выводы о том, насколько каждый из видов заготовки эффективен с точки зрения итогового объемного выхода.

На рис. 2 представлено поперечное сечение пары заготовок с трапециевидными пластию (плоскостью доски, получаемой в результате пропила) и сечением.

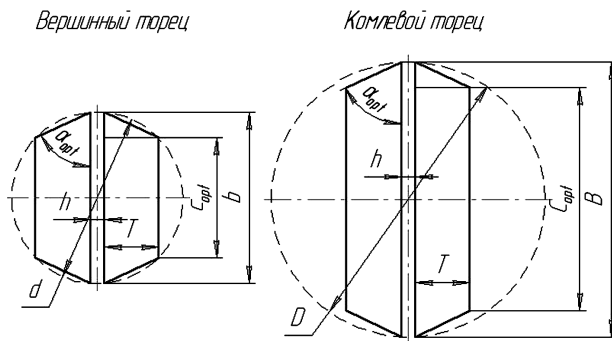


Рис. 2. Сечения заготовки с трапециевидной пластию и сечением в вершинном и комлевом торцах: d — вершинный диаметр исходного бревна; D — комлевой диаметр исходного бревна; T — толщина заготовки; h — величина пропила; b — ширина внутренней пласти заготовки в вершинном торце; B — ширина внутренней пласти заготовки в комлевом торце; c_{opt} — ширина наружной пласти заготовки в вершинном торце; C_{opt} — ширина наружной пласти заготовки в комлевом торце; α_{opt} — оптимальный угол наклона кромки заготовки к пласти, обеспечивающий максимальный объемный выход при заданной толщине заготовки и диаметре бревна,

связанный соотношением $\operatorname{tg} \alpha_{opt} = \frac{2T}{b - c_{opt}}$

С учетом того что $c_{opt} = 2 \sqrt{\left(\frac{d}{2}\right)^2 - \left(\frac{h}{2} + T\right)^2}$,

$$\alpha_{opt} = \arctg \left(\frac{2T}{b - 2 \sqrt{\left(\frac{d}{2}\right)^2 - \left(\frac{h}{2} + T\right)^2}} \right). \quad (1)$$

Примем за L длину бревна, за Sb — сбеги бревна. Тогда объем одной заготовки с трапециевидным сечением и пластию определяется по формуле:

$$V_{trap} = \frac{1}{2} \cdot \left[\left(\frac{b + c_{opt}}{2} \right) \cdot T + \left(\frac{B + C_{opt}}{2} \right) \cdot T \right] \cdot L, \quad (2)$$

при этом $b = 2 \sqrt{\left(\frac{d}{2}\right)^2 - \left(\frac{h}{2}\right)^2}$, $B = 2 \sqrt{\left(\frac{D}{2}\right)^2 - \left(\frac{h}{2}\right)^2}$,

$D = d + Sb \cdot L$.

При имитационном моделировании процесса моделируемая характеристика должна зависеть от случайных параметров.

Пусть d — случайная величина в пределах диапазона $[d_{min}; d_{max}]$, закон распределения которой будет определен ниже; d_{min} и d_{max} — соответственно минимальный и максимальный вершинные диаметры бревен в партии.

Поскольку приемка пиловочника ведется только по верхнему диаметру, сбеги никогда не измеряются. В модели его можно задать как случайную величину с допущением о равномерном законе распределения сбега в пределах, общеизвестных для хвойных пород [1], [5].

Пусть Sb — случайная величина, равномерно распределенная по интервалу $[Sb_0; Sb_0 + \Delta Sb]$, где Sb_0 — минимальный сбеги бревен в партии, а ΔSb — модуль максимального отклонения сбега от минимального.

Учитывая, что $C_{opt} = B - b + c_{opt}$, запишем выражение (2) в виде следующей функциональной зависимости:

$$V_{trap}(d, Sb) = T \cdot L \cdot \left(\sqrt{\left(\frac{d}{2}\right)^2 - \left(\frac{h}{2} + T\right)^2} + \sqrt{\left(\frac{d + Sb \cdot L}{2}\right)^2 - \left(\frac{h}{2}\right)^2} \right). \quad (3)$$

Выражение (3) представляет собой стохастическую модель определения объема заготовки с трапециевидным сечением и пластию в зависимости от двух случайных величин d и Sb .

Рассмотренное выше трапециевидное сечение имеет один технологический недостаток: при склейке заготовок в щит возможно смещение (выдавливание) заготовок друг относительно друга. Данной проблемы можно избежать, если использовать пресс с вертикальным прижимом. Если такой возможности нет, целесообразно получение заготовок со ступенчатым сечением, представленным на рис. 3.

Под количеством ступенек понимается минимальное количество прямоугольников, на которое можно разбить данное ступенчатое сечение (в данном случае их 3). Для обеспечения воз-

возможности склейки заготовок необходимо, чтобы количество ступенек, а также их ширина и высота были одинаковыми.

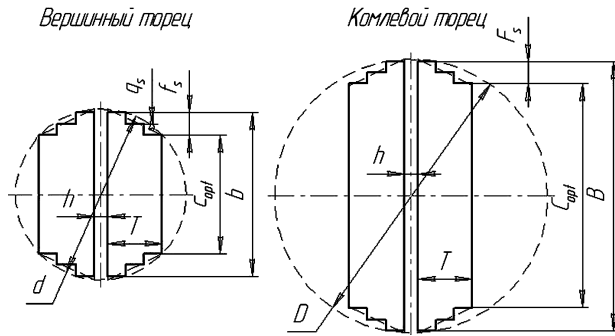


Рис. 3. Сечения заготовки со ступенчатой кромкой в вершинном и комлевом торцах (q_s – ширина ступеньки)

Объем трапециевидальной заготовки со ступенчатым сечением рассчитывается как сумма объемов досок, соответствующих каждой ступеньке:

$$V_{step} = \sum_{j=1}^n \left[\frac{T \cdot L}{k} \cdot \frac{L}{2} \left[2 \left(f_{s_j} + \frac{C_{opt}}{2} \right) + 2 \left(f_{s_j} + \frac{C_{opt}}{2} \right) \right] \right], \quad (4)$$

где k – количество ступенек в сечении; j – порядковый номер ступеньки; f_{s_j} – величина, показывающая, насколько половина ширины каждой ступеньки превышает половину ширины наружной пласти заготовки, и определяемая по следующей формуле:

$$f_{s_j} = \sqrt{\left(\frac{d}{2} \right)^2 - \left(\frac{h}{2} + \frac{T}{k} \cdot j \right)^2} - \frac{C_{opt}}{2}. \quad (5)$$

С учетом (4) и (5) итоговая стохастическая модель для вычисления объема заготовки со ступенчатым сечением и трапециевидальной пласти принимает вид

$$V_{step}(d, Sb) = \sum_j \left[\frac{T \cdot L}{k} \left(2 \sqrt{\left(\frac{d}{2} \right)^2 - \left(\frac{h}{2} + \frac{T}{k} \cdot j \right)^2} + \sqrt{\left(\frac{d+Sb}{2} \right)^2 - \left(\frac{h}{2} \right)^2} - \sqrt{\left(\frac{d}{2} \right)^2 - \left(\frac{h}{2} \right)^2} \right) \right]. \quad (6)$$

В условиях реального производства речь идет не о единичных бревнах, досках или заготовках, а о партиях. Для каждого бревна в партии максимальный объем модели трапециевидальной заготовки выходит, когда кромка заготовки в вершинном торце лежит на образующей бревна. В отличие от этого, объем модели заготовки со ступенчатым сечением зависит не только от геометрии бревна, но и от количества ступенек. Алгоритм для определения максимального из возможных объемов партии ступенчатых заготовок представлен в виде блок-схемы на рис. 4. Используя данный алгоритм, производитель может определить объем партии таких заготовок, задав только количество и длину бревен, максимальный и минимальный диаметр бревна в имеющейся партии, толщину досок и количество ступенек в сечении.

Исходными данными алгоритма являются длина и количество бревен в партии, а также ми-

нимальный и максимальный вершинный диаметры бревен в партии. Длина всех бревен в партии принимается одинаковой. Толщина заготовки T выбирается производителем в зависимости от требуемой толщины клееного щита на выходе.

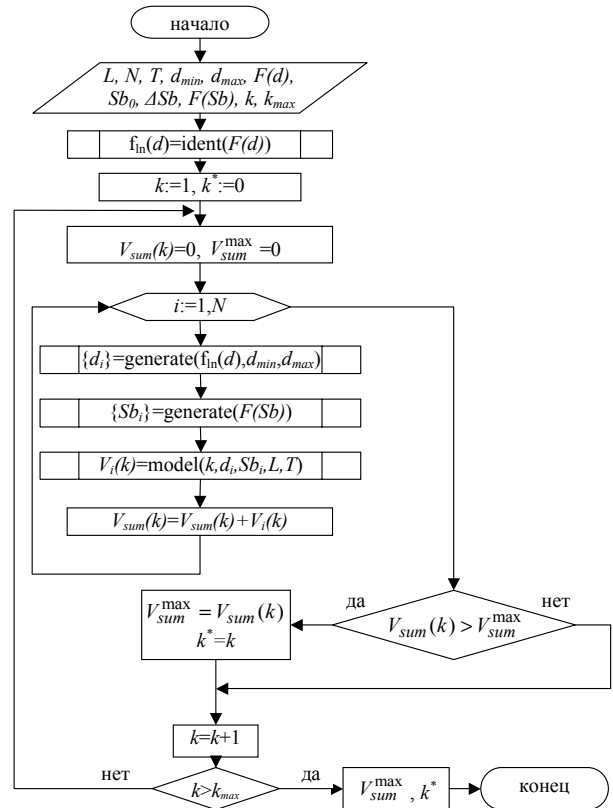


Рис. 4. Блок-схема алгоритма вычисления максимального объема партии заготовок со ступенчатым сечением: N – количество бревен; d_{min} и d_{max} – минимальный и максимальный вершинный диаметры бревен в партии; $F(d)$ – выборка, состоящая из реализаций вершинных диаметров бревен в партии, полученная в результате натурного эксперимента; $F(Sb)$ – равномерный закон распределения сбегов бревен в партии; i – номер бревна; $f_{in}(d) = \text{ident}(F(d))$ – модуль идентификации параметров теоретического распределения вершинных диаметров бревен; $V_{sum}(k)$ – суммарный объем партии заготовок со ступенчатым сечением; $\text{generate}(f_{in}(d), d_{min}, d_{max})$ – пользовательская функция, реализующая случайный вершинный диаметр в диапазоне от d_{min} до d_{max} в соответствии с идентифицированными параметрами теоретического закона распределения; $\text{generate}(F(Sb))$ – пользовательская функция, реализующая случайный сбеги; k – количество ступенек; k_{max} – максимальное технологически приемлемое количество ступенек; k^* и V_{sum}^{max} – оптимальное количество ступенек и соответствующий ему максимальный объем партии заготовок; $V_{sum}(k)$ – суммарный объем партии заготовок с количеством ступенек k ; $\text{model}(k, d_i, Sb_i, L, T)$ – математическая модель (6), определяющая объем заготовки с количеством ступенек k в сечении

При приемке диаметр каждого бревна, как правило, измеряется индивидуально, но вводить все диаметры каждой поступающей на предприятие партии бревен в математическую модель нецелесообразно из-за неоправданных временных затрат. В данном случае следует задаться наиболее подходящим теоретическим законом

распределения диаметров бревен в партии, определенным на основе некоторой экспериментальной выборки.

Для определения закона распределения вершинных диаметров бревен в партии [9] были собраны и обработаны статистические данные о партиях бревен, поступающих на петрозаводский ДОК.

Проверялось соответствие экспериментальных данных теоретическим законам распределения Вейбулла, Гамма-распределения, распределения Гумбеля (экстремального закона) и логнормального закона (рис. 5). После статистической проверки гипотезы о соответствии теоретического закона экспериментальным данным с помощью непараметрических критериев Колмогорова – Смирнова [10] и ω^2 (омега-квадрата) Мизеса [7] в конечном итоге был принят логнормальный закон распределения диаметров как учитывающий специфику распределения продолжительности жизни биологических объектов [3].

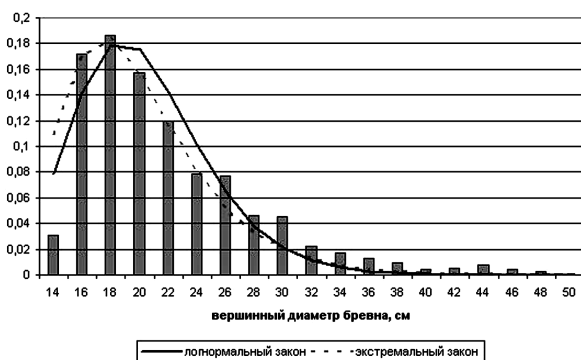


Рис. 5. Результаты подгонки логнормального и экстремального законов к гистограмме распределения вершинных диаметров бревен

Поскольку реальный диаметр бревна не может быть бесконечно малой или большой величиной, логнормальный закон распределения диаметров бревен должен иметь усеченный вид.

В связи с тем что рассматриваемая технология ориентирована в первую очередь на тонкомерные бревна, в том числе на их вершинные части, было решено принять за минимальный сбеж в партии бревен так называемый нормальный сбеж (он равен 1 см/м) [1], [5], максимальное отклонение от нормального принято равным 15 %.

В ходе реализации имитационного моделирования по методу Монте-Карло была сгенерирована партия из 10 000 бревен, что соответствует месячному объему переработки среднего лесоперерабатывающего предприятия, со следующими параметрами: длина – 6 м, вершинные диаметры – от 12 до 30 см, сбеги – от 1,00 до 1,15 см/м. Математическое ожидание и СКО диаметров составили соответственно 21 и 3 см. Толщина получаемых заготовок принята равной 50 мм, а пропилен – 4 мм.

С использованием стохастической модели (3) вычислен объем партии заготовок с трапециевидальным сечением. Алгоритм вычисления максимального объема партии таких заготовок аналогичен алгоритму, приведенному на рис. 4, с той разницей, что результатом его работы вместо оптимального количества ступенек является оптимальный угол наклона кромки заготовки к ее пласти для всей партии бревен. При этом получена зависимость индивидуального оптимального угла наклона кромки заготовки к ее пласти, представленная на рис. 6, которая иллюстрирует выражение (1). Для данной партии индивидуальные оптимальные углы, округленные до целых значений, лежат в пределах 59–79°.

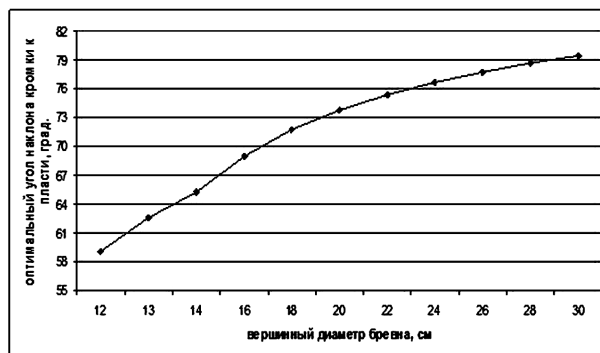


Рис. 6. Зависимость индивидуального угла наклона кромки к пласти для заготовки с трапециевидальным сечением и пластью

Поскольку невозможно склеивать трапециевидальные заготовки с разными углами наклона кромки к пласти, был определен единый для всей партии угол, который обеспечивал бы максимальный объемный выход всей партии. Для этого при переборе всех вариантов углов (21) было установлено ограничение на брак: если общий для партии угол оказывался больше индивидуального, то объем данной заготовки не учитывался в сумме, так как она имеет брак (обзол). На рис. 7 представлена зависимость объемного выхода партии трапециевидальных заготовок от единого для всей партии угла наклона кромки заготовки к пласти. При этом максимум приходится на 62°, что на 3° больше минимального из углов в партии. Это объясняется тем, что на первоначальном этапе роста угла выигрыш от увеличения угла на бревнах больших диаметров превосходит потери из-за образования брака на бревнах меньших диаметров. Однако разница максимального объема с объемом, соответствующим наименьшему в партии углу, пренебрежительно мала, что позволяет рекомендовать при выборе единого для партии угла α остановиться на его минимальном значении. То есть производителю следует определить угол α_{opt} для бревна с наименьшим диаметром в партии по формуле (1) и принять его для всей партии.

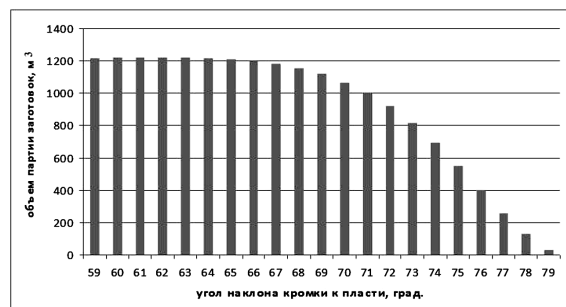


Рис. 7. Зависимость объемного выхода партии трапецидальных заготовок от единого угла наклона кромки к пласти

С использованием модели (6) и алгоритма, изображенного на рис. 4, определены объемы заготовок с количеством ступенек в сечении от 1 до 9. Зависимость итогового объема от количества ступенек показана на рис. 8. Максимальное технологически приемлемое количество ступенек для толщины заготовки 50 мм с точки зрения удобства изготовления и эксплуатации режущего инструмента не превышает $k_{max} = 5$, поэтому принимаем $k^* = 3$.



Рис. 8. Зависимость объема партии ступенчатых заготовок от количества ступенек

В таблице приведены итоговые объемы партий рассмотренных заготовок относительно рассчитанного объема партии обрезных досок.

Относительные объемы партий заготовок различных сечений

Вид заготовки	Объем относительно обрезной доски
Заготовка с трапецидальным сечением и пластью	120,4 %
Заготовка со ступенчатым сечением (3 ступеньки) и трапецидальной пластью	119,1 %

Как видно из таблицы, прирост объема относительно традиционной обрезной доски при смене сечения и пласти на трапецидальные составляет 20,4 %. Объем заготовок со ступенчатым сечением и трапецидальной пластью меньше на 1,3 %. Учитывая незначительную разницу в объемах, при выборе между этими сечениями стоит исходить в первую очередь из технологических особенностей предприятия. Таким образом, рассматриваемый способ получения заготовок позволяет увеличить итоговый полезный выход пиломатериалов с 55 до 66 % от объема исходного сырья.

Итак, на основе разработанных стохастических моделей объемов заготовок различной геометрической формы и найденного вида закона распределения вершинного диаметра исходного сырья был проведен вычислительный эксперимент на основе методов имитационного моделирования, который позволил определить оптимальные геометрические параметры заготовок с точки зрения получения максимального объемного выхода пилопродукции и удобства их дальнейшей обработки. Разработанные модели позволяют производителям определить наиболее подходящие им параметры заготовок в зависимости от технологических ограничений, имеющих партий пиловочника и параметров заготовок на выходе.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Анучин Н. П. Определение объема хлыстов и сортиментов. М.: Лесн. пром-сть, 1985. 184 с.
- Бродский Ю. И., Белотелов Н. В., Павловский Ю. Н. Имитационное моделирование: Учеб. пособие. М.: ИЦ «Академия», 2008. 236 с.
- Гаврилов Л. А., Гаврилова Н. С. Биология продолжительности жизни. М.: Наука, 1991. 280 с.
- Гончаров В. А., Бокшинский В. Ю., Буглай В. М. Технология изделий из древесины. М.: Лесн. пром-сть, 1991. 528 с.
- Загребев В. В., Сухих В. И., Швиденко А. З., Гусев Н. Н., Мошкалев А. Г. Общесоюзные нормативы для таксации лесов: Справочник. М.: Колос, 1992. 495 с.
- Захарьин Г. И., Зыкин С. И. Пути увеличения выхода пиломатериалов // Механическая обработка древесины. Обзорная информация. 1989. № 10. 24 с.
- Мартынов Г. В. Критерии омега-квадрат. М.: Наука, 1978. 80 с.
- Сморчков А. А., Делова М. И. Реологические свойства клееной древесины при длительном нагружении изгибаемых элементов // Материалы III междунар. симпозиума «Строение, свойства и качество древесины-2000». Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2000. С. 282–284.
- Уфимцев М. В. Методы анализа данных: Учеб. пособие. М.: МАКС ПРЕСС, 2007. 133 с.
- Чернецкий В. И. Математическое моделирование стохастических систем. Петрозаводск: Изд-во ПетрГУ, 1994. 488 с.

МИХАИЛ АБОВИЧ ПОДРИГАЛО

доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой технологии машиностроения и ремонта машин автомобильного факультета, Харьковский национальный автомобильно-дорожный университет
pmikhab@rambler.ru

ДМИТРИЙ МИХАЙЛОВИЧ КЛЕЦ

кандидат технических наук, доцент кафедры технологии машиностроения и ремонта машин автомобильного факультета, Харьковский национальный автомобильно-дорожный университет
prof_777@mail.ru

ВЛАДИМИР ВЛАДИМИРОВИЧ НЕМЦЕВ

студент 5-го курса автомобильного факультета, Харьковский национальный автомобильно-дорожный университет
nem4ik@mail.ru

ВЛИЯНИЕ РАЗНОСТИ КОЭФФИЦИЕНТОВ СОПРОТИВЛЕНИЯ КАЧЕНИЮ ВЕДУЩИХ КОЛЕС НА УСТОЙЧИВОСТЬ АВТОМОБИЛЯ ПРОТИВ ЗАНОСА

Исследовано влияние разности коэффициентов сопротивления качению левых и правых ведущих колес на устойчивость автомобиля против заноса. Получены зависимости, связывающие величины коэффициентов блокировки межосевых дифференциалов с величиной соотношения коэффициентов сопротивления качению колес и геометрическими параметрами автомобиля.

Ключевые слова: устойчивость, сопротивление качению, дифференциал, занос

ВВЕДЕНИЕ

При качении колеса с эластичной шиной по дороге с твердым покрытием вес автомобиля, приходящийся на колесо, деформирует шину и опорную поверхность. В передней половине пятна контакта происходит радиальное сжатие шины, сопровождаемое уменьшением радиуса от свободного до динамического, а в задней половине контакта – уменьшение сжатия, сопровождаемое увеличением радиуса от динамического до свободного. В результате внутреннего трения в шине и относительно небольшого трения между шиной и дорогой изменяется эпюра элементарных нормальных реакций и смещается результирующая сила от оси вращения колеса на величину плеча сопротивления качению. При этом вертикальная реакция создает относительно центра вращения колеса момент сопротивления качению. Момент сопротивления качению оказывает влияние на устойчивость и управляемость автомобиля в результате несимметричности касательных реакций, действующих на его колеса. Несимметричность касательных реакций возможна, например, при различных нормальных нагрузках на правое и левое колеса каждой из осей автомобиля. В результате несимметричности касательных реакций создается момент, стремящийся повернуть автомобиль относительно оси, перпендикулярной к плоскости движения.

При действии боковых сил (поворот автомобиля, поперечный уклон дороги, боковой ветер, движение по неровной опорной поверхности)

коэффициент сопротивления качению может значительно возрасти в результате боковых деформаций шин. С увеличением передаваемого через колесо крутящего момента указанный коэффициент увеличивается как в результате большей тангенциальной деформации, так и в результате увеличения работы трения в контакте шины с опорной поверхностью.

АНАЛИЗ ПОСЛЕДНИХ ДОСТИЖЕНИЙ И ПУБЛИКАЦИЙ

Фундаментальным исследованиям сопротивления качению посвящены работы Е. А. Чудакова [10], В. И. Кнороза [5], Г. А. Смирнова [9], А. С. Шелухина [11], А. Н. Туренко [2] и других ученых. За рубежом также опубликовано большое число трудов по этому вопросу.

В работе [6] отмечается, что на величину коэффициента сопротивления качению в общем случае оказывают влияние следующие факторы:

- конструктивные: диаметр шины, ширина профиля шины, толщина профиля шины, рисунок протектора, число слоев корда, конструкция каркаса, величина передаваемого через шину момента;
- технологические: используемые материалы, технология изготовления шин;
- эксплуатационные: тип и состояние дороги, скорость движения, вес, приходящийся на колесо.

С увеличением скорости движения колеса коэффициент сопротивления качению, как правило, возрастает. Начиная с 80–90 км/ч даже на ровных дорогах указанный коэффициент начи-

нает быстро увеличиваться [1]. Оптимизация конструкции шины, улучшающая ее энергетические свойства, позволяет снизить сопротивление качению колес в 2–3 раза [4].

А. С. Литвиновым совместно с Я. Е. Фаробиным [7] был поставлен эксперимент по определению моментов сопротивления качению шины 6,00–16 при углах увода, изменяющихся в пределах 0–14° при различных нормальных нагрузках и разных давлениях воздуха в шине.

Определено, что при движении автомобиля по дороге с твердым покрытием коэффициент сопротивления качению увеличивается с уменьшением давления воздуха в шине. При передаче крутящего момента коэффициент немного возрастает, так как шина в этом случае деформируется не только в вертикальном направлении, но и по окружности. При большом передаваемом крутящем моменте элементы протектора проскальзывают по дороге и на трение в области контакта затрачивается дополнительная энергия.

Трение в дифференциале рассмотрено в работе А. С. Литвинова [6]. Однако в указанной работе не рассмотрено влияние разности коэффициентов сопротивления качению на ведущих колесах на величину дополнительных составляющих боковых сил, действующих на переднюю и заднюю оси автомобиля. В работе [3] приведены результаты экспериментальных исследований грузовых автомобилей МАЗ и Урал с серийными (коническими) дифференциалами и дифференциалами свободного хода и повышенного трения. Определено, что при установке дифференциалов повышенного трения значительно снижается курсовая устойчивость автомобиля. Однако в этих исследованиях не определены условия возникновения заноса автомобиля при бортовой неравномерности коэффициентов сопротивления качению ведущих колес и различных значениях коэффициента блокировки дифференциала.

ЦЕЛЬ И ПОСТАНОВКА ЗАДАЧ ИССЛЕДОВАНИЯ

Целью исследования является определение условий устойчивого движения автомобиля при бортовой неравномерности коэффициентов сопротивления качению ведущих колес. Для достижения указанной цели необходимо решить следующие задачи:

- исследовать динамику ведущего моста автомобиля;
- оценить устойчивость автомобилей различной компоновки при разности коэффициентов сопротивления качению ведущих колес различных бортов.

ДИНАМИКА ВЕДУЩЕГО МОСТА АВТОМОБИЛЯ

На рис. 1 приведена схема сил, моментов и реакций, действующих на ведущее колесо автомобиля.

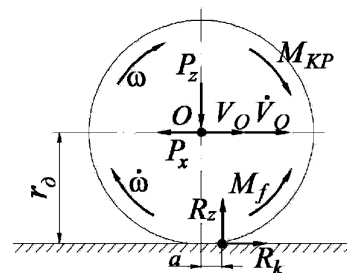


Рис. 1. Схема сил, действующих на ведущее колесо автомобиля:

P_z – вертикальная сила, действующая на колесо;
 R_z – нормальная реакция, действующая на колесо;
 R_k – горизонтальная реакция дороги на колесо;
 $M_{кр}$ – крутящий (вращающий) момент на колесе; P_x – горизонтальная реакция на оси колеса; ω и $\dot{\omega}$ – угловые скорость и ускорение колеса; V_O и $\dot{V}_O$ – линейные скорость и ускорение колеса; r_o – динамический радиус колеса; M_f – момент сопротивления качению; a – плечо трения (коэффициент трения качения)

У ведущего колеса крутящий (вращающий) момент $M_{кр}$ превосходит момент сопротивления качению, который определяется зависимостью

$$M_f = a \cdot R_z. \quad (1)$$

Тангенциальная (касательная) реакция на колесе R_k имеет положительное направление, то есть совпадает по направлению с вектором скорости V . Момент сопротивления воздуха вращению колеса и сила сопротивления воздуха его поступательному перемещению весьма малы, и ими обычно пренебрегают.

Касательная реакция на колесе

$$R_k = \frac{M_{кр} - a \cdot R_z}{r_o} = P_{окр} - f \cdot R_z, \quad (2)$$

где $P_{окр}$ – окружная сила на колесе, f – коэффициент сопротивления качению.

$$f = \frac{a}{r_o}. \quad (3)$$

Занос автомобиля может возникнуть вследствие появления поворачивающего момента, обусловленного неравномерностью касательных реакций на ведущих колесах противоположных бортов машины [8]. Одной из причин появления бортовой неравномерности касательных реакций является изменение коэффициента сопротивления качению (рис. 2).

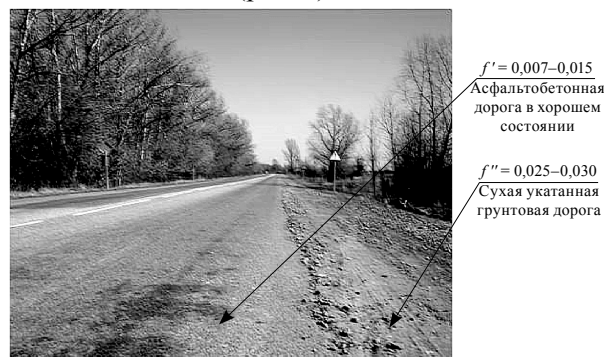


Рис. 2. Участок окружной дороги г. Харькова с различными значениями коэффициента сопротивления качению f' и f''

На рис. 3 приведена схема сил, действующих на заднеприводный автомобиль при разности коэффициентов сопротивления качению ведущих колес.

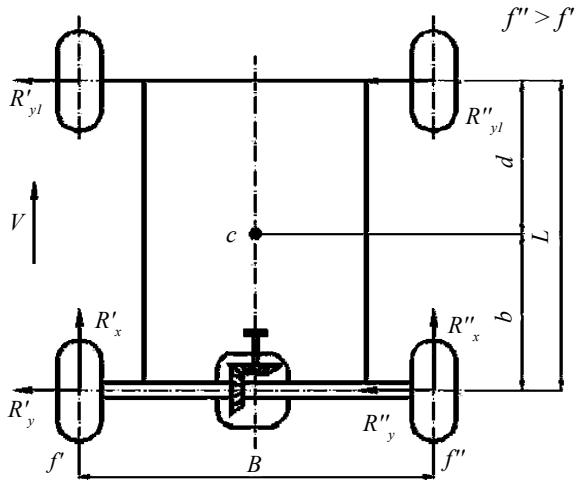


Рис. 3. Схема сил, действующих на заднеприводный автомобиль при разности коэффициентов сопротивления качению ведущих колес:

V — линейная скорость автомобиля; f' и f'' — коэффициенты сопротивления качению левого и правого колес, $f'' > f'$; R'_y, R''_y — боковые реакции на левом и правом колесах задней оси; b, d — координаты проекции центра масс автомобиля c на горизонтальную плоскость; R'_x, R''_x — боковые реакции на левом и правом колесах передней оси; B, L — колея и продольная колесная база автомобиля; R'_x, R''_x — касательные реакции на левом и правом колесах

Появление разности указанных коэффициентов приводит к перераспределению касательных реакций на колесах, при этом мост стремится развернуться вокруг колеса, у которого большее сопротивление качению. Следовательно, колесо, имеющее меньшую величину коэффициента сопротивления качению, является забегающим, а большую — отстающим.

Предположим, что на забегающем колесе реализована предельная касательная реакция, равная предельной силе сцепления. В этом случае крутящий момент на забегающем колесе

$$M'_{кр} = (\varphi + f') \cdot R'_z \cdot r_o = 0,5 \cdot (\varphi + f') \cdot R_z \cdot r_o. \quad (4)$$

Крутящий момент на отстающем колесе

$$M''_{кр} = M'_{кр} \cdot \frac{1-K'}{K'} = 0,5 \cdot (\varphi + f'') \cdot R_z \cdot r_o \times \frac{1-K'}{K'} = 0,5 \cdot (\varphi + f'') \cdot R_z \cdot r_o \cdot \lambda_{\bar{o}l}, \quad (5)$$

где K' — доля крутящего момента, приходящаяся на забегающее колесо,

$$K' = \frac{M'_{кр}}{M'_{кр} + M''_{кр}}, \quad (6)$$

$\lambda_{\bar{o}l}$ — коэффициент блокировки дифференциала,

$$\lambda_{\bar{o}l} = \frac{1-K'}{K'}. \quad (7)$$

Касательные реакции на ведущих колесах:

$$R'_x = \frac{M'_{кр}}{r_o} - f' \cdot R'_z = 0,5 \cdot (\varphi + f') \cdot R_z - 0,5 \cdot f' \cdot R_z = 0,5 \cdot \varphi \cdot R_z; \quad (8)$$

$$R''_x = \frac{M''_{кр}}{r_o} - f'' \cdot R''_z = 0,5 \cdot (\varphi + f'') \cdot R_z \cdot \lambda_{\bar{o}l} - 0,5 \cdot f'' \cdot R_z. \quad (9)$$

Поворачивающий момент, возникающий на оси автомобиля,

$$M_{нов} = \frac{B}{2} \cdot (R''_x - R'_x). \quad (10)$$

Боковая сила, которую способна воспринимать ось автомобиля без бокового скольжения:

$$R_y = R'_y + R''_y = R''_y = \sqrt{\varphi^2 \cdot R_z^2 - R_x'^2}. \quad (11)$$

Величина $R'_y = 0$, поскольку на забегающем колесе мы допустили равенство касательной реакции предельной силе по сцеплению. Учитывая, что $R'_z = 0,5 \cdot R_z$, и подставляя (9) в (11), получим после преобразований:

$$R_y = 0,5 \cdot \varphi \cdot R_z \cdot \sqrt{1 - \left[\left(1 + \frac{f''}{\varphi} \right) \cdot \lambda_{\bar{o}l} - \frac{f''}{\varphi} \right]^2}. \quad (12)$$

После подстановки (8) и (9) в (10) получим:

$$M_{нов} = \frac{B}{4} \cdot (\varphi + f'') \cdot R_z \cdot (\lambda_{\bar{o}l} - 1). \quad (13)$$

Выражение под корнем в уравнении (12) больше нуля при

$$\lambda_{\bar{o}l} < \frac{f''}{\varphi + f''}, \quad (14)$$

поскольку в противном случае ось автомобиля неспособна воспринимать боковую силу. Это означает, что боковая устойчивость оси обеспечивается при $R''_x < R'_x$ и $M_{нов} < 0$ (см. зависимость (10)). Поэтому выражение (13) следует преобразовать к виду

$$M_{нов} = \frac{B}{2} \cdot (R'_x - R''_x) = \frac{B}{4} \cdot (\varphi + f'') \cdot R_z \cdot (1 - \lambda_{\bar{o}l}). \quad (15)$$

УСТОЙЧИВОСТЬ АВТОМОБИЛЯ ПРИ РАЗНОСТИ КОЭФФИЦИЕНТОВ СОПРОТИВЛЕНИЯ КАЧЕНИЮ ВЕДУЩИХ КОЛЕС РАЗЛИЧНЫХ БОРТОВ

Коэффициент устойчивости автомобиля

$$K_{уст} = \frac{M_{стб}}{M_{нов}} = \begin{cases} \frac{R_{y_2} \cdot L}{M_{нов_2}} & \text{— для заднеприводного автомобиля;} \end{cases} \quad (16)$$

$$\begin{cases} \frac{R_{y_2} \cdot L}{M_{нов_1}} & \text{— для переднеприводного автомобиля;} \end{cases} \quad (17)$$

$$\begin{cases} \frac{R_{y_2} \cdot L}{M_{нов_1} + M_{нов_2}} & \text{— для полноприводного автомобиля;} \end{cases} \quad (18)$$

где $M_{стб}$ — стабилизирующий момент,

$$M_{стб} = R_{y_2} \cdot L, \quad (19)$$

R_{y2} – максимальная возможная боковая реакция дороги на задней оси автомобиля; $M_{пов1}$, $M_{пов2}$ – поворачивающие моменты на передней и задней ведущих осях соответственно,

$$M_{пов1} = \frac{B}{4} \cdot (\varphi + f'') \cdot R_{z1} \cdot (1 - \lambda_{\delta l1}); \quad (20)$$

$$M_{пов2} = \frac{B}{4} \cdot (\varphi + f'') \cdot R_{z2} \cdot (1 - \lambda_{\delta l2}). \quad (21)$$

Очевидно, что условие устойчивости будет обеспечено при $K_{уст} \geq 1$. Условие отсутствия бокового увода за счет бокового скольжения передней оси под действием поворачивающего момента

$$R_{y1} \cdot L \geq \begin{cases} M_{пов2} & \text{– для заднеприводного автомобиля;} \\ M_{пов1} & \text{– для переднеприводного автомобиля;} \\ M_{пов1} + M_{пов2} & \text{– для полноприводного автомобиля,} \end{cases} \quad (22)$$

$$R_{y1} \cdot L \geq \begin{cases} M_{пов1} & \text{– для переднеприводного автомобиля;} \end{cases} \quad (23)$$

$$M_{пов1} + M_{пов2} \text{ – для полноприводного автомобиля,} \quad (24)$$

где R_{y1} – максимально возможная боковая реакция дороги на передней оси автомобиля.

Максимально возможные боковые реакции дороги на осях автомобиля:

$$\begin{cases} 0,5 \cdot \varphi \cdot R_{z2} \cdot \sqrt{1 - \left[\left(1 + \frac{f''}{\varphi}\right) \cdot \lambda_{\delta l} - \frac{f''}{\varphi} \right]^2} & \text{– для задне- и полноприводного автомобиля;} \end{cases} \quad (25)$$

$$\varphi \cdot R_{z2} \text{ – для переднеприводного автомобиля,} \quad (26)$$

$$\begin{cases} 0,5 \cdot \varphi \cdot R_{z1} \cdot \sqrt{1 - \left[\left(1 + \frac{f''}{\varphi}\right) \cdot \lambda_{\delta l} - \frac{f''}{\varphi} \right]^2} & \text{– для задне- и полноприводного автомобиля;} \end{cases} \quad (27)$$

$$\varphi \cdot R_{z1} \text{ – для заднеприводного автомобиля.} \quad (28)$$

В выражениях (25)–(28) параметры с индексом «1» относятся к передней оси автомобиля, с индексом «2» – к задней оси. При равномерном движении, пренебрегая влиянием аэродинамической силы, получим:

$$R_{z1} = m \cdot g \cdot \frac{b}{L}, \quad (29)$$

$$R_{z2} = m \cdot g \cdot \frac{d}{L}, \quad (30)$$

где m – общая масса автомобиля.

Подставляя выражения (20), (21), (25)–(30) в уравнения (16), (17), (18), получим после преобразований:

$$K_{уст} = \begin{cases} 2 \frac{L}{B} \cdot \frac{\sqrt{1 - \left[\left(1 + \frac{f''}{\varphi}\right) \lambda_{\delta l} - \frac{f''}{\varphi} \right]^2}}{\left(1 + \frac{f''}{\varphi}\right) \cdot (1 - \lambda_{\delta l})} & \text{– для заднеприводного автомобиля;} \end{cases} \quad (31)$$

$$4 \frac{L}{B} \cdot \frac{\varphi \cdot d/b}{(\varphi + f'') \cdot (1 - \lambda_{\delta l})} \text{ – для переднеприводного автомобиля;} \quad (32)$$

$$2 \frac{d}{B} \cdot \frac{\sqrt{1 - \left[\left(1 + \frac{f''}{\varphi}\right) \lambda_{\delta l} - \frac{f''}{\varphi} \right]^2}}{\left(1 + \frac{f''}{\varphi}\right) \cdot (1 - \lambda_{\delta l})} \text{ – привод на все колеса.} \quad (33)$$

Графики зависимостей $K_{уст}(\lambda_{\delta l})$ при различных значениях f'' для автомобилей каждого из указанных типов приведены на рис. 4, 5, 6. Устойчивость автомобиля против заноса обеспечивается при $K_{уст} \geq 1$.

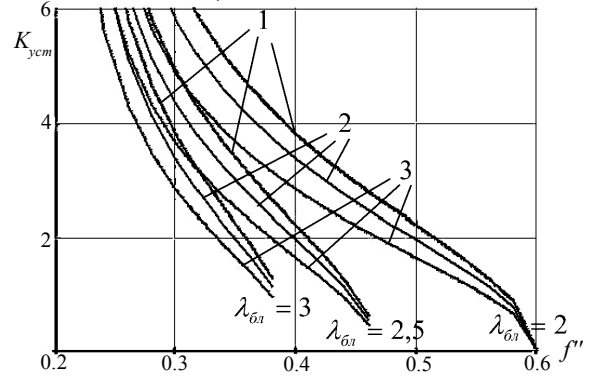


Рис. 4. Зависимость $K_{уст} = K_{уст}(f'')$ для заднеприводного автомобиля при различных значениях L/B :
1 – $L/B = 1,9$ (BMW 318i); 2 – $L/B = 1,68$ (VW 1600);
3 – $L/B = 1,41$ (MCC Smart)

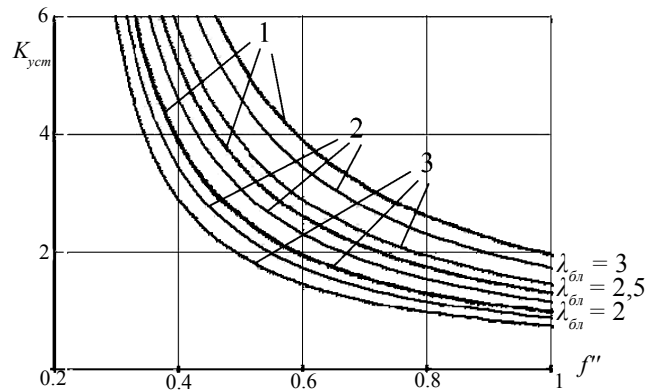


Рис. 5. Зависимость $K_{уст} = K_{уст}(f'')$ для переднеприводного автомобиля при различных значениях параметра $\Phi = \frac{L}{B} \cdot \frac{d}{b}$:
1 – $\Phi = 2,03$ (ALFA Romeo 166); 2 – $\Phi = 1,91$ (SEAT Toledo 1,8);
3 – $\Phi = 1,8$ (BA3-2110)

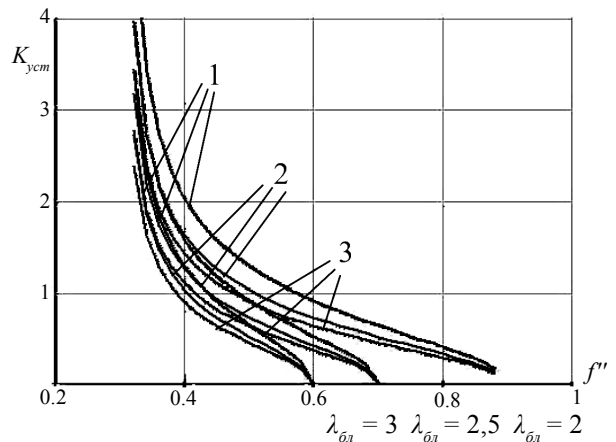


Рис. 6. Зависимость $K_{уст} = K_{уст}(f'')$ для полноприводного автомобиля при различных значениях d/B : 1 – $d/B = 1,0$ (FORD Explorer); 2 – $d/B = 0,8$ (BA3-21213);
3 – $d/B = 0,7$ (AUDI A6 1,8 Quattro)

ВЫВОДЫ

1. Полученные зависимости позволяют оценить устойчивость автомобиля против заноса и бокового увода при наличии бортовой неравномерности коэффициентов сопротивления качению левых и правых ведущих колес.

2. Снижение коэффициента сцепления колес с дорогой увеличивает опасность заноса при существовании разности коэффициентов сопротивления качению ведущих колес.

3. При попадании одного из ведущих колес заднеприводного автомобиля на участок дороги с коэффициентом $f \geq 0,35$ (рыхлый снег, грунтовая дорога в период распутицы, бездорожье) возможно снижение $K_{уст}$ меньше единицы. Для полноприводных автомобилей $K_{уст} \leq 1$ при попадании на участок с $f \geq 0,4$ (заболоченная местность). Переднеприводные автомобили более устойчивы против заноса в тяговом режиме движения, чем полно- и заднеприводные.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Автомобильный справочник Bosch: Пер. с англ. М.: За рулем, 1999. 895 с.
2. Александров Е. Е., Волонцевич Д. О., Карпенко В. А. и др. Динамика транспортно-тяговых колесных и гусеничных машин / Под ред. А. Н. Туренко. Харьков: ХГАДТУ (ХАДИ), 2001. 642 с.
3. Андреев А. Ф., Ванцевич В. В., Лефаров А. Х. Дифференциалы колесных машин. М.: Машиностроение, 1987. 176 с.
4. Волков В. П. Теорія експлуатаційних властивостей автомобіля: Навч. посібник. Харків: ХНАДУ, 2004. 292 с.
5. Кнороз В. И. Работа автомобильной шины. М.: Транспорт, 1976. 237 с.
6. Литвинов А. С. Управляемость и устойчивость автомобиля. М.: Машиностроение, 1971. 416 с.
7. Литвинов А. С., Фаробин Я. Е. Автомобиль. Теория эксплуатационных свойств. М.: Машиностроение, 1989. 230 с.
8. Подригало М. А., Волков В. П., Клец Д. М. и др. Динамика автомобиля / Под ред. М. А. Подригало. Харьков: Изд-во ХНАДУ, 2008. 424 с.
9. Смирнов Г. А. Теория движения колесных машин. М.: Машиностроение, 1990. 352 с.
10. Чудаков Е. А. Теория автомобиля. М.: Машгиз, 1950. 343 с.
11. Шелухин А. С. Анализ потерь на качение пневматических шин в условиях движения автомобиля по дороге с твердым покрытием // Труды НАМИ. Вып. 79. М.: Изд-во НАМИ, 1965. С. 21–45.

ИЛЬЯ РОМАНОВИЧ ШЕГЕЛЬМАН

доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой технологии и оборудования лесного комплекса лесотехнического факультета, Петрозаводский государственный университет

shegelman@onego.ru

ПАВЕЛ ВЛАДИМИРОВИЧ БУДНИК

аспирант кафедры технологии и оборудования лесного комплекса лесотехнического факультета, Петрозаводский государственный университет

budnikpavel@yandex.ru

ОБОСНОВАНИЕ ВЫЛЕТА МАНИПУЛЯТОРА И РЕЖИМОВ РАБОТЫ ВАЛОЧНО-ТРЕЛЕВОЧНО-ПРОЦЕССОРНОЙ МАШИНЫ

В статье рассмотрена методика обоснования оптимального значения максимального вылета манипулятора для валочно-трелевочно-процессорной машины. Приведены рекомендуемые значения максимального вылета манипулятора для различных природно-производственных условий.

Ключевые слова: вылет манипулятора, оптимальный, валочно-трелевочно-процессорная машина, захват дерева, погрузка в коник

В Петрозаводском государственном университете обоснована перспективность создания принципиально новой конструкции валочно-трелевочно-процессорной машины (ВТПМ) манипуляторного типа. На эту машину получен патент на полезную модель [4]. Обоснована компоновка машины и технология ее работы [3], [1]. ВТПМ состоит из базовой машины, платформы и манипулятора. На платформе установлен зажимной коник, на манипуляторе – харвестерная головка, используемая как в качестве захватно-срезающего устройства (ЗСУ), так и процессорного устройства. Машина на лесосеке выполняет функции валочно-трелевочной машины (ВТМ), а на верхнем складе – процессора. Благодаря этому обеспечивается концентрация отходов лесозаготовок (сучья, ветви, вершины) на верхнем складе, что повышает эффективность их использования в качестве вторичных ресурсов.

Величина оптимального значения максимальной длины манипулятора для бесчokerных трелевочных и валочно-трелевочных машин исследована в работах [2], [5]. Поскольку предлагаемая ВТПМ ввиду специфичности сочетания выполняемых операций отличается от исследованных в названных работах машин ЛП-17, ВП-80, ВП-100, ТБ-1, ТБ-1М, ТБ-1М-15, харвестера, форвардера, возникает необходимость обоснования ее максимального вылета манипулятора и режима работы.

Согласно расчетной схеме (рис. 1), ВТПМ обрабатывает с одной стоянки площадь, равную $S_1 = 2l_m^2 \cos \alpha - bl_m$, где α – угол между нормалью к продольной оси машины и образующей площади ($\alpha = \frac{\pi}{6}$), рад; b – ширина волока (прохода), м.

Суммарные затраты времени на набор пачки ВТПМ с одной стоянки определяются по формуле:

$$T = \left(d_0 + d_1 + \frac{(0,05897 + 0,52 \cdot q)(l_m^2 + l_m l_0 + l_0^2)}{3} + \frac{0,847(l_m + l_0)}{2} \right) \times \\ \times \frac{Q}{q} + \frac{10^4 (t_{mp} + t_{pm}) \cdot Q}{M \cdot (2l_m^2 \cos 30^\circ - bl_m)} + \\ + \frac{10^4 \cdot Q}{M \cdot V_{\phi n} (2l_m \cos 30^\circ - b)} - \frac{l_m}{V_{\phi n}}, \quad (1)$$

где d_0 , d_1 – члены в уравнении регрессии, не зависящие от объема хлыста и вылета манипулятора, с; q – средний объем хлыста, м³; l_m – максимальный вылет манипулятора, м; l_0 – минимальный вылет манипулятора, м; Q – объем трелевочной пачки деревьев без учета кроны, который можно погрузить в коник, м³; t_{mp} – время перевода технологического оборудования из транспортного положения в рабочее, с; t_{pm} – время перевода технологического оборудования из рабочего положения в транспортное, с; M – запас леса на га, м³; $V_{\phi n}$ – скорость машины во время переездов между рабочими стоянками, м/с.

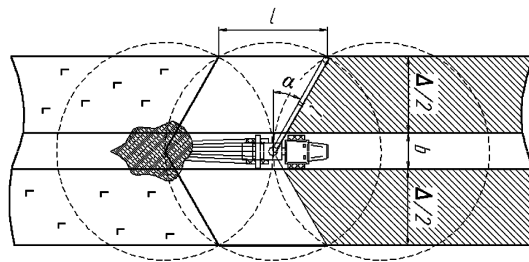


Рис. 1. Схема площадки леса, разрабатываемой ВТПМ с одной рабочей стоянки

Для нахождения оптимальной длины манипулятора следует определить точку, где суммарные затраты времени имеют минимальное значение, то есть первая производная равна нулю:

$$\frac{dT}{dl_m} = \left(\frac{(0,05897 + 0,52 \cdot q)(2l_m + l_0)}{3} + \frac{0,847}{2} \right) \times \frac{Q}{q} - \frac{10^4(t_{mp} + t_{pm}) \cdot Q}{M} \cdot \frac{4l_m \cos 30^\circ - b}{(2l_m \cos 30^\circ - b)^2} - \frac{2 \cdot 10^4 Q \cos 30^\circ}{M \cdot V_{\phi n} (2l_m \cos 30^\circ - b)^2} - \frac{1}{V_{\phi n}} = 0. \quad (2)$$

После преобразований выражения (2) получим уравнение пятой степени (значения параметров приведены в табл. 1):

$$a_1 l_m^5 + a_2 l_m^4 + a_3 l_m^3 + a_4 l_m^2 + a_5 l_m + a_6 = 0. \quad (3)$$

Таблица 1

Значения параметров

Параметр	Значение параметра
a_1	$16 \cdot \cos^2 30^\circ \cdot Q \cdot (0,05897 + 0,52 \cdot q) \cdot M \cdot V_{\phi n}$
a_2	$4 \cdot \cos \alpha \cdot M \cdot (Q \cdot V_{\phi n} \cdot (2 \cdot (0,05897 + 0,52 \cdot q) \cdot (\cos 30^\circ \cdot l_0 - 2 \cdot b) + 3 \cdot \cos 30^\circ \cdot 0,847) - 6 \cdot \cos 30^\circ \cdot q)$
a_3	$4 \cdot M \cdot b \cdot (Q \cdot V_{\phi n} \cdot ((0,05897 + 0,52 \cdot q) \cdot (b - 2 \cdot l_0 \cdot \cos 30^\circ) - 3 \cdot 0,847) + 6 \cdot q \cdot \cos 30^\circ)$
a_4	$b^2 \cdot M \cdot (Q \cdot V_{\phi n} \cdot (2 \cdot l_0 \cdot (0,05897 + 0,52 \cdot q) + 3 \cdot 0,847) - 6 \cdot q) - 12 \cdot q \cdot Q \cdot 10^4 \cdot \cos 30^\circ$
a_5	$-24 \cdot q \cdot \cos 30^\circ \cdot (t_{mp} + t_{pm}) \cdot Q \cdot 10^4 \cdot V_{\phi n}$
a_6	$6 \cdot q \cdot b \cdot (t_{mp} + t_{pm}) \cdot Q \cdot 10^4 \cdot V_{\phi n}$

Решение данного уравнения осуществлялось с помощью оригинальной «Программы расчета оптимального значения максимального вылета манипулятора». С помощью полученных выше зависимостей и данной программы было вычислено оптимальное значение максимального вылета манипулятора для различных регионов России (табл. 2). На рис. 2 приведена зависимость оптимального значения максимального вылета манипулятора от запаса леса на 1 га и среднего объема хлыста. Расчеты проведены при следующих значениях исходных данных: угол между нормалью к продольной оси модели и образующей площадки – 30° , минимальный вылет манипулятора – 1,4 м, скорость машины между рабочими стоянками – 0,8 м/с, суммарное время на перевод технологического оборудования в рабочее положение и обратно в транспортное – 10 с, площадь поперечного сечения коника – $2,2 \text{ м}^2$.

Анализ результатов расчетов показал, что оптимальное значение величины максимального вылета манипулятора уменьшается с увеличением запаса леса на 1 га и возрастает с увеличением среднего объема хлыста. В зависимости от специфики регионов России на ВТПМ рекомендуется устанавливать манипуляторы с разным максимальным вылетом. Например, для Республики Карелии можно рекомендовать манипулятор с

вылетом 7,2 м, а для Вологодской области достаточно будет 6,7 м.

Таблица 2

Оптимальное значение максимального вылета манипулятора

Регион	Средний объем хлыста, м^3	Средний диаметр, см	Запас на га, м^3	Оптимальный вылет, м
Архангельская область	0,25	19,10	138	6,99
Вологодская область	0,32	20,40	187	6,67
Республика Карелия	0,29	19,90	132	7,21
Ленинградская область	0,33	20,80	234	6,32
Мурманская область	0,18	18,80	54	8,56
Новгородская область	0,40	21,50	219	6,57
Кировская область	0,39	21,10	224	6,51
Пермский край	0,38	21,00	212	6,59
Свердловская область	0,44	23,70	192	6,86
Тюменская область	0,49	24,30	134	7,60
Томская область	0,42	22,40	181	6,93
Кемеровская область	0,41	22,00	150	7,26
Красноярский край	0,71	29,00	137	7,79
Иркутская область	0,74	32,90	196	7,14

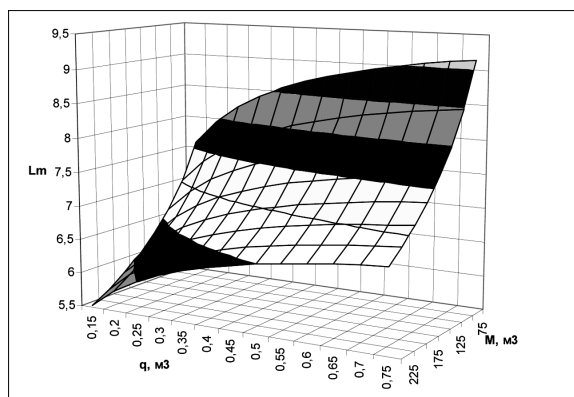


Рис. 2. Зависимость оптимального значения максимального вылета манипулятора от среднего объема хлыста и запаса на 1 га

В целом, как видно из приведенных данных (табл. 2), оптимальное значение максимального вылета манипулятора варьируется от 6 до 9 м. В настоящее время широко используются телескопические манипуляторы, которые имеют возможность изменять свою длину. Поэтому для ВТПМ можно рекомендовать универсальный манипулятор, способный эффективно работать в различных природно-производственных условиях с вылетом 6,3–6,5 м и телескопической вставкой 2–2,3 м.

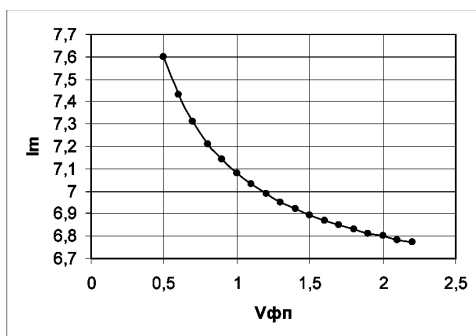


Рис. 3. График зависимости оптимального значения максимального вылета манипулятора от скорости движения ВТПМ в процессе формирования пачки деревьев

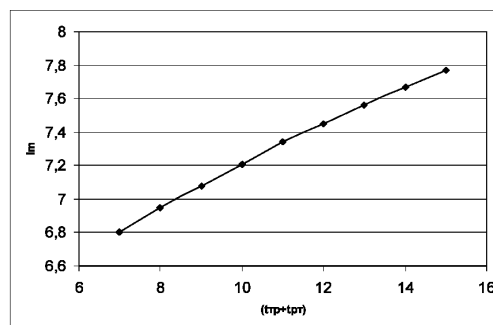


Рис. 4. График зависимости оптимального значения максимального вылета манипулятора от времени, затрачиваемого на перевод оборудования из транспортного положения в рабочее и обратно при наборе пачки

Кроме специфики регионов на величину максимального вылета манипулятора влияет режим работы ВТПМ в процессе формирования пачки деревьев (рис. 3, 4).

Расчеты показали, что с увеличением скорости движения машины между рабочими стоянками значение вылета уменьшается (рис. 3). С увеличением времени на перевод технологического оборудования из транспортного положения в рабочее и обратно величина оптимального значения максимального вылета манипулятора также увеличивается (рис. 4).

Следует отметить, что исследования по оптимальным параметрам манипулятора носят предварительный характер, так как требуют уточнения, например, по условию устойчивости машины, экспериментальной проверки и экономической целесообразности.

ВЫВОДЫ

1. Предложенная в работе расчетная схема (формулы (1)–(3), рис. 1) и разработанная про-

грамма позволяют определять оптимальный вылет ВТПМ в зависимости от среднего объема хлыста, среднего запаса на 1 га, объема трелеваемой пачки, минимального вылета манипулятора, ширины волока, времени перевода технологического оборудования из транспортного положения в рабочее и обратно, скорости машины во время переездов между рабочими стоянками.

2. Для повышения производительности ВТПМ рекомендуется вылет манипулятора от 6 до 9 м (в зависимости от специфики лесонасаждений и режимов работы). Возможна установка на ВТПМ универсального манипулятора с вылетом 6,3–6,5 м и телескопической вставкой 2–2,3 м.

3. Для определения вылета манипулятора рекомендуется математическая модель (3), учитывающая его зависимость от лесотаксационных показателей древостоя, режимов работы и некоторых конструктивных особенностей лесозаготовительной машины.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Баклагин В. Н., Будник П. В. Обоснование универсальной лесозаготовительной машины для заготовки сортиментов и технологического процесса производства топливной щепы мобильными рубительными машинами на лесосеке. Петрозаводск, 2008. 22 с.
2. Шегельман И. Р., Скрыпник В. И., Галактионов О. Н. Техническое оснащение современных лесозаготовок. СПб.: ПРОФИ-ИНФОРМ, 2005. 344 с.
3. Шегельман И. Р., Кузнецов А. В., Будник П. В., Баклагин В. Н., Скрыпник В. И. Подготовка и переработка древесного сырья для получения щепы энергетического назначения (биотоплива) // Ученые записки Петрозаводского государственного университета. Сер. «Естественные и технические науки». 2010. № 8(113). С. 79–82.
4. Шегельман И. Р., Скрыпник В. И. Валочно-трелевочно-процессорная машина. Патент на полезную модель. Заявка № 200914475422(063722).
5. Harstela P. Forest work science and technology, part I. Silva Carelica 25. 1993. 113 p.

АРТЕМ ВЛАДИМИРОВИЧ ЖУКОВ

кандидат технических наук, старший преподаватель кафедры прикладной математики и кибернетики математического факультета, Петрозаводский государственный университет

zhukov_a_v@rbcmail.ru

ОЛЕГ ВАЛЕРЬЕВИЧ ГУСЕВ

преподаватель кафедры прикладной математики и кибернетики математического факультета, Петрозаводский государственный университет

eleset@gmail.com

АЛГОРИТМ ФИЛЬТРАЦИИ ЗАПРОСОВ К РЕСУРСОЕМКИМ WEB-СЕРВИСАМ НА ОСНОВЕ АЛГЕБРАИЧЕСКИХ СООТНОШЕНИЙ

В статье описаны проблемы обеспечения устойчивой работы web-сервисов в режимах предельных нагрузок, когда количество направляемых к серверу запросов превышает имеющиеся возможности по их обработке. Показано, что предложенные ранее методы управления запросами не всегда приемлемы ввиду использования моделей линейной оптимизации. Предложены алгоритмы, позволяющие в ряде случаев упростить задачу фильтрации за счет использования простых математических соотношений.

Ключевые слова: перегрузка, управление запросами, фильтрация трафика, сервер, компьютерные сети

ВВЕДЕНИЕ

Одним из важнейших требований к любой сетевой системе, ориентированной на предоставление информационных услуг широкому кругу пользователей, является обеспечение устойчивой бесперебойной работы, в том числе и в режимах нагрузки, близкой к предельным возможностям системы по количеству обрабатываемых запросов [2], [5]. Ситуации, когда система не справляется с обработкой поступающих запросов из-за недостатка имеющихся аппаратных ресурсов, будем называть перегрузкой. В частности, данная проблема актуальна для корпоративных информационных систем, построенных на базе интерактивных web-технологий, где функционал системы является отражением бизнес-функций предприятия.

Основные меры, направленные на предотвращение перегрузок, сводятся либо к наращиванию общей производительности системы [3], либо к управлению запросами, то есть к отклонению части из них на этапе поступления в систему в соответствии с некоторыми критериями. Надо отметить, что в силу специфики функционирования web-сервисов подходы, успешно применяемые при функционировании некоторых транспортных протоколов, например TCP [8], и основанные на обратной связи, позволяющей предотвратить перегрузку путем направления соответствующего сообщения отправляющему запросы клиенту, неприменимы, что вынуждает искать иные альтернативы.

© Жуков А. В., Гусев О. В., 2011

Поскольку только управление запросами позволяет предотвращать ситуации перегрузок даже при недостатке имеющихся вычислительных ресурсов, в рамках данной статьи сосредоточим внимание именно на этом методе.

В работах [4], [7] рассматривалось управление запросами к ресурсоемким web-сервисам (системам дистанционного обучения и сетевым системам моделирования). В частности, было предложено производить управление запросами путем отсечения части из них согласно долям, определенным соответствующими коэффициентами для каждого сетевого сервиса. Пересчет коэффициентов производится регулярно с периодичностью, позволяющей учесть изменения характеристик потока поступающих в систему запросов.

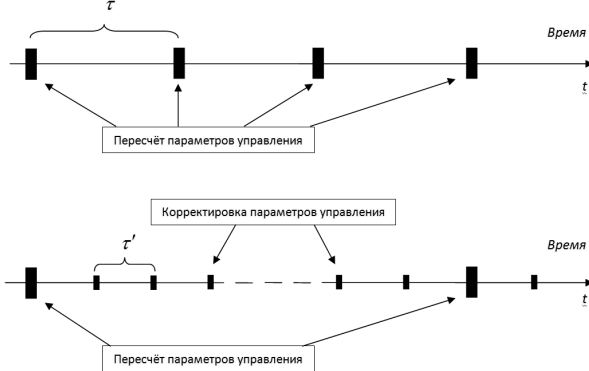
Несмотря на явные достоинства предложенных моделей управления запросами, они не лишены недостатков: при поиске параметров управления запросами необходимо всякий раз решать оптимизационную задачу, что при регулярном пересчете и большом количестве учитываемых факторов может стать ощутимой дополнительной нагрузкой на сервер и ограничивает как сферу применения предложенных моделей, так и возможности их развития.

Поэтому основными задачами исследования стали поиск возможностей для снижения вычислительной сложности рассмотренных схем управления запросами и повышение эффективности управления в ситуациях значительной флуктуации интенсивности поступающих запросов.

ИЗМЕНЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ УПРАВЛЕНИЯ ЗАПРОСАМИ

В идеале параметры управления запросами должны в точности соответствовать характеристикам потока поступающих запросов, однако на практике такое соответствие поддерживать затруднительно: в общем случае предугадать поведение сетевого трафика крайне сложно, к тому же изменение параметров управления запросами требует учета большого количества влияющих факторов, что неизбежно сказывается на вычислительной сложности алгоритма.

В предложенных моделях в целях актуализации параметров управления их пересчет предлагается производить регулярно через интервал времени τ , выбираемый индивидуально для каждой системы (см. рисунок). Фактически параметры управления запросами изменяются дискретно, в то время как параметры потока запросов – непрерывно.



Моменты изменения параметров управления запросами

Учитывая, что пересчет является затратной с вычислительной точки зрения операций, один из возможных путей развития данной схемы заключается в том, чтобы взамен полного пересчета осуществлять корректировку параметров через меньший интервал времени τ' . Алгоритм корректировки должен позволять получать пусть и не строго оптимальный результат, но близкий к нему, при этом требуется гораздо меньше вычислительных ресурсов. Это позволит снизить нагрузку на сервер за счет увеличения временного интервала между полными пересчетами параметров управления без ущерба для их адекватности.

Достижение таких требований возможно, если алгоритм будет учитывать лишь наиболее значимые факторы при принятии решения об обслуживании.

УЧЕТ ТОЛЬКО ОДНОГО ВИДА РЕСУРСОВ

Возможности системы по обработке всех поступающих запросов определяются количеством имеющихся доступных вычислительных ресурсов. В информационных системах в роли таких ресурсов, как правило, выступают производи-

тельность процессора, доступный объем оперативной памяти, пропускная способность линий связи, доступный объем дисковой памяти и т. д.

На практике перегрузка обычно возникает вследствие недостатка ресурсов только одного-двух видов, в то время как остальные не востребованы полностью. Поэтому в ряде случаев можно говорить о наличии в системе наиболее востребованного ресурса, запасы которого будут истощены в первую очередь. При наличии в системе такого ресурса его достаточность фактически будет определять предел общей производительности системы, а ограничения на объем остальных можно пренебречь.

Пусть в системе имеется множество сетевых сервисов M ($I \in M$) и множество видов вычислительных ресурсов K ($j \in K$). Будем считать известными интенсивности потоков запросов к сервисам λ_i и потребности сервисов в ресурсах каждого вида S_i^j . Доступное количество имеющихся в системе ресурсов каждого вида ограничим соответствующим значением V^j .

Введем в рассмотрение степень востребованности j -го ресурса w^j , представляющую собой отношение необходимого количества данного ресурса для обслуживания всего потока запросов к его доступному количеству в системе.

$$w^j = \frac{\sum_{i \in M} \lambda_i \cdot S_i^j}{V^j}, \quad j \in K$$

Если $w^j \leq 1$, можно говорить о том, что данный ресурс не израсходуется полностью и не может стать причиной перегрузки, а потому не влияет на принятие решения об отклонении запросов. Если $w^j > 1$, доступного количества данного ресурса недостаточно для обслуживания всех поступающих запросов, что должно быть учтено при определении параметров управления.

Чем больше степень востребованности w^j , тем в большей мере ресурс j ограничивает возможности системы по обработке запросов. Таким образом, выбор наиболее востребованного ресурса может происходить по формуле

$$w^q = \max \{w^j \mid w^j > 1\}.$$

Поскольку потребность в ресурсах различных видов для работы разных сервисов различна, а управление запросами не всегда предполагает пропорциональное сокращение трафика ко всем сервисам, приведенная формула должна быть усилена в части выполнения ограничений по имеющимся объемам для ресурсов всех видов.

В наиболее общем случае достаточно, чтобы значение w^q наиболее востребованного ресурса значительно превышало значения потребности в ресурсах других видов.

$$\begin{cases} w^q = \max \{w^j \mid w^j > 1\} & j \in K \\ w^q \gg \max \{w^j\} & j \in K \setminus q \end{cases}$$

Таким образом, при соблюдении ряда условий число ограничений на количество доступных вычислительных ресурсов в модели может быть сокращено за счет исключения тех из них, которые не влияют на итоговый результат.

СПОСОБ КОРРЕКТИРОВКИ БЕЗ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧИ ОПТИМИЗАЦИИ

Рассмотрим способ поиска параметров управления запросами, основанный на отказе от формулирования задачи математического программирования. Для предотвращения заторов при передаче дейтаграмм в IP-сетях успешно применяется метод взвешенной максиминной схемы равномерного распределения ресурсов [1]. Ниже представлена адаптация данного алгоритма применительно к управлению запросами к web-сервисам. Будем исходить из того, что в системе имеется лишь один ресурс, количество которого определяет ее возможности по обработке запросов.

Введем основные обозначения модели. Пусть в системе имеется множество сетевых сервисов M ($i \in M$). Будем считать известными интенсивности потоков запросов без управления к сервисам на предыдущем $\lambda = \{\lambda_1, \dots, \lambda_n\}$ и текущем $\lambda = \{\lambda_1, \dots, \lambda_n\}$ этапах определения (корректировки) параметров управления. Общий объем разделяемого ресурса ограничим значением V . Через S_i обозначим объем ресурса, необходимый для выполнения сервиса i .

Результатом работы алгоритма будем считать определение компонент вектора $\mu = \{\mu_1, \dots, \mu_n\}$ как максимально возможных интенсивности запросов к соответствующим сетевым сервисам, не вызывающим перегрузки. Зная $\mu = \{\mu_1, \dots, \mu_n\}$ и $\lambda = \{\lambda_1, \dots, \lambda_n\}$, легко найти коэффициенты, определяющие долю запросов, которые необходимо отклонить для предотвращения перегрузки.

Будем считать, что определенный для каждого сетевого сервиса приоритет P_i влияет на определение доли ресурса. Объем ресурса V_i , гарантированно доступный для i -го сервиса, может быть найден по формуле

$$V_i = V \frac{P_i}{\sum_{k \in M} P_k} = V \cdot P_i.$$

Дополнительно в модели делается допущение, что объемы имеющихся вычислительных ресурсов являются постоянными величинами. Данный подход не вполне соответствует реальным системам, где эти величины зависят от многих факторов [6]. К тому же при одновременном выполнении нескольких запросов общий требуемый объем ресурсов не всегда может быть представлен в виде алгебраических сумм потребностей каждого запроса в отдельности.

Из-за указанных допущений результат работы алгоритма не является строго оптималь-

ным, что особенно может проявиться в случаях, когда количество активных сервисов невелико, а характеристики потока запросов подвержены значительным флуктуациям. Это позволяет рассматривать предложенный способ как пригодный только для корректировки имеющихся параметров управления, а их расчет должен производиться по другим схемам.

Для начала рассмотрим систему, в которую поступают запросы только к одному сервису. Интенсивность потока с управлением μ либо совпадает с интенсивностью входного потока без управления λ , если имеющихся ресурсов достаточно для обслуживания всех поступающих запросов, либо ограничена имеющимися возможностями системы. Зависимость между λ и μ можно представить в виде

$$\lambda = \{\lambda_1\} \quad \mu = \{\mu_1\}$$

$$\mu_1 = \min \left\{ \frac{V}{S_1}, \lambda_1 \right\}.$$

Рассмотрим систему, в которой функционируют два сервиса. Интенсивность потока запросов с управлением к сервису в этом случае ограничена либо интенсивностью потока запросов без управления λ , либо гарантированно выделяемым этому сервису объемом ресурса V_i в совокупности с объемом ресурса, незадействованного вторым сервисом, если тот не использует свой лимит полностью.

$$\lambda = \{\lambda_1, \lambda_2\} \quad \mu = \{\mu_1, \mu_2\}$$

$$\mu_1 = \min \left\{ \lambda_1, \max \left\{ \frac{V_1}{S_1}, \frac{V - \min \{S_2 \lambda_2, V_2\}}{S_1} \right\} \right\},$$

$$\mu_2 = \min \left\{ \lambda_2, \max \left\{ \frac{V_2}{S_2}, \frac{V - \min \{S_1 \lambda_1, V_1\}}{S_2} \right\} \right\}.$$

Поскольку при работе 2 ресурсов $V = V_1 + V_2$, справедливо неравенство

$V - \min \{S_2 \lambda_2, V_2\} = V_1 + V_2 - \min \{S_2 \lambda_2, V_2\} \geq V_1$, а формулы могут быть приведены к виду

$$\mu_1 = \min \left\{ \lambda_1, \frac{V - \min \{S_2 \lambda_2, V_2\}}{S_1} \right\} = \min \left\{ \lambda_1, \frac{V - \min \{S_2 \lambda_2, V \cdot \frac{P_2}{P_1 + P_2}\}}{S_1} \right\}$$

$$\mu_2 = \min \left\{ \lambda_2, \frac{V - \min \{S_1 \lambda_1, V_1\}}{S_2} \right\} = \min \left\{ \lambda_2, \frac{V - \min \{S_1 \lambda_1, V \cdot \frac{P_1}{P_1 + P_2}\}}{S_2} \right\}.$$

Рассмотрим систему, в которой запросы поступают к нескольким сервисам. Для начала разделим все имеющиеся сервисы на два множества:

$$1) M^{ДОСТ} = \{i | S_i \cdot \lambda_i \leq V_i\} \quad i \in M, \quad (1)$$

если сервису достаточно предоставляемого гарантированного объема ресурсов V_i для обслуживания потока запросов λ_i в полном объеме ($\lambda_i = \mu_i$). В таком случае объем предоставляемых сервису ресурсов может быть сокращен до необходимого значения (произведения интенсивнос-

ти входящего потока λ_i и сложности выполнения этого одного запроса S_i).

2) $M^{НЕДОСТ} = \{i \mid S_i \cdot \lambda_i > V_i\}$ $i \in M$, если сервису недостаточно предоставляемого гарантированного объема ресурсов V_i для обслуживания потока запросов λ_i в полном объеме.

Учитывая, что сервисы из множества $M^{ДОСТ}$ не используют полностью предоставляемые им вычислительные ресурсы, образующиеся резервы могут быть перераспределены в пользу сервисов из множества $M^{НЕДОСТ}$. Найдем объем неостребованных сервисами из множества $M^{ДОСТ}$ резервов $V^{СВОБ}$ через разность между гарантированно предоставляемыми объемами ресурса и фактическим его использованием:

$$\begin{aligned} V^{СВОБ} &= \sum_{j \in M^{ДОСТ}} (V_j - S_j \cdot \lambda_j) = V - \sum_{j \in M^{ДОСТ}} S_j \cdot \lambda_j - \sum_{j \in M^{НЕДОСТ}} V_j = \\ &= V - \sum_{j \in M} \min\{S_j \cdot \lambda_j, V_j\} = V - \sum_{j \in M} \min\{S_j \cdot \lambda_j, V \cdot P_j\}. \end{aligned} \quad (2)$$

Полученный объем разделим между нуждающимися сервисами $i \in M^{НЕДОСТ}$ согласно принципам приоритетов. Тогда объем дополнительно выделяемых ресурсов для каждого конкретного сервиса $V_i^{ДОП}$ ($i \in M^{НЕДОСТ}$) может быть найден по формуле:

$$V_i^{ДОП} = V^{СВОБ} \cdot \frac{P_i}{\sum_{k \in M^{НЕДОСТ}} P_k} = \left(V - \sum_{j \in M} \min\{S_j \cdot \lambda_j, V \cdot P_j\} \right) \cdot \frac{P_i}{\sum_{k \in M^{НЕДОСТ}} P_k}$$

$i \in M^{НЕДОСТ}$.

В результате для сервисов из множества $M^{ДОСТ}$ интенсивность потока μ_i будет определяться интенсивностью потока λ_i , а для сервисов из множества $M^{НЕДОСТ}$ — отношением объема предоставляемых ресурсов (гарантированно предоставляемый объем V_i и дополнительно выделяемый из неиспользуемых резервов объем $V_i^{ДОП}$) к сложности выполнения запросов S_i . Итоговая формула примет вид:

$$\lambda = \{\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_n\} \quad \mu = \{\mu_1, \mu_2, \dots, \mu_n\}$$

$$\begin{aligned} \mu_i &= \min\left\{\lambda_i, \frac{V_i + V_i^{ДОП}}{S_i}\right\} = \\ &= \min\left\{\lambda_i, \frac{V \cdot P_i + \left(V - \sum_{j \in M} \min\{S_j \cdot \lambda_j, V \cdot P_j\}\right) \cdot \frac{P_i}{\sum_{k \in M^{НЕДОСТ}} P_k}}{S_i}\right\}. \end{aligned} \quad (3)$$

Коэффициент, отражающий долю запросов, которые необходимо пропустить для выполнения к конкретному сервису, может быть легко найден через соотношение:

$$x_i = \begin{cases} \frac{\mu_i}{\lambda_i} & \lambda_i > 0 \\ 0 & \lambda_i = 0 \end{cases}.$$

Алгоритм управления запросами:

Шаг 1. Определение необходимости в управлении запросами

Оценивается разница $V^{НЕДОСТ}$ между общим количеством имеющегося ресурса и фактической потребностью в нем для обслуживания всех поступающих в систему запросов.

$$V^{НЕДОСТ} = \sum_{i \in M} \lambda_i \cdot S_i - V.$$

В зависимости от значения:

1) Если $V^{НЕДОСТ} \leq 0 \Rightarrow \mu_i = 1 \quad \forall i \in M$, име-

ющегося в системе объема вычислительного ресурса достаточно для выполнения всех поступающих запросов, управление запросами не требуется. Работа алгоритма прекращается.

2) Если $V^{НЕДОСТ} > 0$, имеющегося в системе объема вычислительного ресурса недостаточно для выполнения всех поступающих запросов, требуется фильтрация части запросов (переход к шагу 2).

Шаг 2. Определение необходимости в корректировке

Определяется необходимость корректировки существующих параметров управления запросами исходя из изменения характеристик потока запросов. Составляется перечень сервисов, интенсивность запросов к которым существенно не изменилась. Введем поправочный коэффициент $\omega > 0$ для устранения незначительных флуктуаций параметров трафика.

$$M^{НЕИЗМ} = \bigcup \{i \mid (1 - \omega) \cdot \bar{\lambda}_i < \lambda_i < (1 + \omega) \cdot \bar{\lambda}_i\} \quad i \in M.$$

Если $M^{НЕИЗМ} = M$, можно говорить о том, что характеристики потока запросов изменились незначительно, а существующие параметры управления запросами не нуждаются в корректировке. В остальных случаях необходима корректировка (переход к шагу 3).

Шаг 3. Корректировка параметров управления запросами

Производится определение параметров управления запросами в зависимости от сложности их выполнения, уровня приоритета и интенсивности поступления.

1) По формуле (1) определяется перечень сетевых сервисов, интенсивность запросов к которым не превышает выделенные для них квоты.

2) По формуле (2) определяются объемы дополнительно распределяемого ресурса для каждого сетевого сервиса.

3) По результатам полученных значений с использованием соотношения (3) на основе имеющейся информации об интенсивности запросов к каждому сервису определяется доля запросов, которые должны быть отклонены с целью предотвращения возникновения перегрузки.

Шаг 4. Фильтрация трафика

На основе полученных коэффициентов и длительности периода управления запросами определяется предельное число запросов для каждого сетевого сервиса. Запросы, превышающие установленные квоты, отклоняются.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Предложенный алгоритм позволяет упростить процесс управления запросами по сравнению с ранее предлагаемыми моделями за счет учета лишь наиболее значимых факторов, а также дает возможность более оперативно реагировать на изменение характеристик потока поступающих запросов. Управление запросами может дать положительный эффект, однако результат во многом зависит от динамики изменения характеристик потока запросов и правильности выбора критериев управления.

На наш взгляд, развитие подобных алгоритмов должно следовать по пути уменьшения вычислительной сложности при обеспечении достаточной эффективности управления запросами. Вопросы применимости в реальных системах, оценки эффективности предложенных моделей являются темой дальнейших исследований и оставлены за рамками данной статьи.

В заключение стоит отметить, что управление запросами не является полноценным восполнением недостающих вычислительных способностей системы, хотя и позволяет системе с минимальными потерями преодолевать ситуации, когда возможность качественного оказания информационной услуги наиболее уязвима. Гарантированное обслуживание подразумевает наращивание вычислительных ресурсов сервера и/или уменьшение сложности выполнения запросов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Вегешна Ш. Качество обслуживания в сетях IP: Пер. с англ. М.: Издательский дом «Вильямс», 2003. 368 с.
2. Гусев О. В., Поляков В. В., Жуков А. В., Поляков С. В. Проблема адекватной оценки производительности веб-серверов в корпоративных сетях на предприятиях ЦБП // Материалы 6-й науч.-техн. конф. «Новые информационные технологии в ЦБП и энергетике». Петрозаводск, 2004. С. 84–87.
3. Дудченко В. Управление производительностью прикладных систем // Открытые системы. СУБД. 2005. № 3. С. 50–53.
4. Жуков А. В., Аминова И. В., Поляков В. В. О некоторых механизмах предотвращения перегрузок на web-серверах. Петрозаводск, 2005. 26 с. Деп. в ВИНТИ 04.05.05, № 654-B2005.
5. Кучерявый Е. А. Управление трафиком и качеством обслуживания в сети Интернет. СПб.: Наука и техника, 2004.
6. Менаске Д., Алмейда В. А. Ф. Производительность Web-служб. Анализ, оценка и планирование: Пер. с англ. СПб.: ООО «ДиаСофтЮП», 2003. 480 с.
7. Поляков В. В. Стратегия обслуживания запросов к Web-сервисам в условиях ограниченных ресурсов вычислительной системы // Труды ПетрГУ. Сер. «Прикладная математика и информатика». Вып. 12. Петрозаводск, 2007.
8. Postel J. Transmission Control Protocol // RFC 793. 1981.

АЛЕКСАНДР НИКОЛАЕВИЧ КИРИЛЛОВ

доктор физико-математических наук, ведущий научный сотрудник лаборатории моделирования природно-технических систем Института прикладных математических исследований, Карельский научный центр РАН
 kirillov@krc.karelia.ru

МОДЕЛИРОВАНИЕ УПРАВЛЯЕМОЙ ДИНАМИКИ ГРУППЫ ПЕРИОДИЧЕСКИХ ВАРОЧНЫХ РЕАКТОРОВ

Рассматривается задача управления процессом производства целлюлозы периодическим способом. Строится математическая модель динамики группы варочных реакторов. Для согласованного функционирования технологической линии предложен алгоритм управления.

Ключевые слова: управление, целлюлоза, математическая модель, динамика, реактор

ВВЕДЕНИЕ

При производстве целлюлозы периодическим способом варочные котлы объединяются в технологическую линию с последовательным обслуживанием их на стадиях загрузки щепой и химикатами и выгрузки целлюлозной массы. Для того чтобы материальные потоки, входящие в отдел варки и выходящие из него, имели постоянные временные характеристики, составляется циклограмма, то есть график работы котлов, который обеспечивает их последовательный выход на стадии загрузки и выгрузки [2]. Задача системы обслуживания состоит в выдерживании этого графика. Но действие возмущений, таких как падение давления греющего пара, вынужденные задержки процесса варки при отказах оборудования смежных производств, нарушения технологического регламента, изменение характеристик сырья и химикатов, приводит к нарушению графика работы варочных реакторов, что снижает производительность варочного отдела. В [3] для обеспечения инвариантности циклограммы к колебаниям параметров пара строится кусочно-постоянная функция расхода пара. При этом рассматривается частный случай, при котором происходит наложение не более двух стадий варки. Не рассматривается возможность выхода на разгрузку нескольких реакторов одновременно, не учитывается динамика стадии химических превращений. Таким образом, не обеспечивается инвариантность циклограммы по отношению к перечисленным выше возмущениям. В связи с этим предлагается новый подход к моделированию безопасной динамики функционирования технологической линии в процессе варки целлюлозы, основанный на рассмотрении последовательности реакторов как динамической системы с переменной структурой.

© Кириллов А. Н., 2011

ПОСТРОЕНИЕ МОДЕЛИ

Рассмотрим сначала общую постановку задачи и предложим подход к математическому моделированию системы управления группой реакторов. Пусть n реакторов объединены последовательно в технологическую линию, i – номер реактора, $i = 1, \dots, n$. При этом реакторы загружаются последовательно начиная с первого, в порядке возрастания их номеров, и циклически, то есть после последнего реактора n загружается первый и т. д. Процесс варки для каждого реактора можно разбить на следующие этапы: загрузка, химические превращения, выгрузка, простой с целью осмотра. Последовательное осуществление этих этапов назовем стадией с номером k , $k = 1, \dots, N$. Выделим этап химических превращений как управляемый с помощью изменения параметров температурно-временного режима. Остальные этапы будут полагаться неуправляемыми.

Пусть, $\Delta_{3k}^i = [t_{3k-2}^i; t_{3k-1}^i]$, $\Delta_{nk}^i = [t_{3k-1}^i; t_{3k}^i]$, $\Delta_{pk}^i = [t_{3k}^i; t_{3k+1}^i]$, $\Delta_{ok}^i = [t_{3k+1}^i; t_{3k+2}^i]$ – промежутки времени, в течение которых в i -м реакторе происходят k -е этапы загрузки (з), химических превращений (п), разгрузки (р), простоя (останова) (о), соответственно, $i = 1, 2, \dots, n$, $k = 1, 2, \dots, N$. При этом промежутки Δ_{3k}^i , Δ_{pk}^i , Δ_{ok}^i рассматриваются как независимые от управления и полагаются постоянными. Возникает задача управления этапами химических превращений таким образом, чтобы не происходило выхода на разгрузку более одного реактора одновременно. Иначе говоря, надо так управлять процессом, чтобы выполнялись условия

$$\Delta_{pk}^i \cap \Delta_{pk}^{i+m} = \emptyset, \quad \Delta_{p(k+1)}^i \cap \Delta_{pk}^{i+m} = \emptyset, \quad (1)$$

где $m = 1, 2, \dots, n-i$, $i = 1, 2, \dots, n-1$, $k = 1, 2, \dots, N$.

Первое условие (1) запрещает одновременную разгрузку для реакторов, находящихся на

одной, k -й, стадии, второе – для случая, когда реакторы с меньшими номерами уже вышли на следующую, $(k + 1)$ -ю, стадию, а реакторы с большими номерами еще находятся на предыдущей, k -й, стадии. Фактически надо за счет регулирования допустимого времени варки обеспечить выполнение условий (1). Назовем режим функционирования группы реакторов безопасным, если не происходит одновременная разгрузка более одного реактора.

Моделируемый процесс имеет циклический характер. Введем вектор структуры $\gamma = (\gamma_1, \dots, \gamma_n)$ следующим образом [4]: $\gamma_i(t) = 1$, если i -й реактор находится в стадиях осмотра, загрузки и химических превращений; $\gamma_i(t) = 0$, если i -й реактор находится в стадии разгрузки. Тогда безопасному режиму соответствует вектор структуры, имеющий в каждый момент времени не более одной нулевой компоненты. При этом происходит последовательный переход от структуры, у которой $\gamma_i = 0$, к структуре с $\gamma_{i+1} = 0$ и от $\gamma_n = 0$ к $\gamma_1 = 0$. Данную систему можно отнести к классу циклических гибридных систем [5], [6].

Перейдем к конкретизации модели. Будем полагать, что динамика химических превращений в i -м неизотермическом реакторе периодического действия в безразмерных переменных на k -й стадии задается уравнениями [1]

$$\dot{x}_i = -x_i e^{\frac{1}{y_i}}, \dot{y}_i = x_i e^{\frac{1}{y_i}} + \mu_i (y_{i0} - y_i), \quad (2)$$

где x_i, y_i, μ_i, y_{i0} – концентрация реагента, температура, коэффициент теплопередачи, температура стенки соответственно в i -м реакторе. Процесс варки в i -м реакторе продолжается до тех пор, пока концентрация реагента не станет меньше некоторой пороговой величины $c_i > 0$. Но условие $x_i - c_i = 0$ может оказаться «ложным» сигналом окончания процесса варки вследствие не точности измерений, неопределенности параметров, возмущающих воздействий. Учитывая эти обстоятельства, предлагается придать решению об окончании процесса варки инерционный, позволяющий избежать поспешности характер. Для этого введем переменные z_i , удовлетворяющие уравнениям

$$\dot{z}_i = x_i - c_i. \quad (3)$$

Процесс варки в i -м реакторе предлагается прекращать в тот момент времени, когда выполнится условие $z_i = d_i$, где d_i – заданная постоянная, то есть в момент времени t_i такой, что

$$z_i(t_i) = z_{i0} + \int_{t_{i0}}^{t_i} (x_i - c_i) dt = d_i, \quad (4)$$

где $z_{i0} = z_i(t_{i0})$, t_{i0} – начальный момент времени для этапа химических превращений. Полагаем, что $z_{i0} > d_i > 0$. При достижении переменной z_i значения d_i процесс варки прекращается, и реактор выходит на разгрузку. Смысл этого условия состоит в следующем. В начальный момент времени t_{i0} полагаем $z_{i0} = z_i(t_{i0}) > d_i$. Далее в силу пер-

вого уравнения системы (2) переменная $x_i(t)$ убывает к нулю, и с некоторого момента времени разность $x_i - c_i$ станет и останется отрицательной. Тогда переменная z_i также будет убывать (к $-\infty$) и достигнет значения d_i . Наличие интеграла обеспечивает инерционность при принятии решения о завершении стадии химических превращений. Таким образом, уравнения (2) задают динамику химических превращений в i -м реакторе при условии $z_i > d_i$. В тот момент времени, когда $z_i = d_i$, эта стадия заканчивается и начинается разгрузка.

УСЛОВИЯ СУЩЕСТВОВАНИЯ БЕЗОПАСНОГО РЕЖИМА

Рассмотрим i -й реактор, то есть систему (2), (3), на некоторой стадии k . Найдем границы промежутка Δ_{nk}^i , которые можно обеспечить за счет регулирования температурного режима на k -стадии. Пусть температура в реакторе постоянна: $y_i = \bar{y}_i$. Тогда из (2) получаем $x_i(t) = x_{i0} e^{-a_i(t-t_{i0})}$,

где $x_{i0} = x_i(t_{i0})$, $a_i = e^{\frac{1}{\bar{y}_i}}$. При этом закон изменения хладагента имеет вид $y_{i0} = y_1 - \frac{a_i x_i(t)}{\mu_i}$. Далее из (3) получаем:

$$z_i(t) = z_{i0} - \frac{x_{i0}}{a_i} \cdot (e^{-a_i(t-t_{i0})} - 1) - c_i(t - t_{i0}).$$

Пусть t_i – первый момент времени, в который $z_i(t_i) = d_i$. В этот момент заканчивается процесс варки и начинается разгрузка котла. Найдем границы изменения t_i при условии, что температура в реакторе удовлетворяет технологическим ограничениям: $\bar{y} \in [y_{imin}; y_{imax}]$.

Пусть $t_i(a_i)$ – функция, определяемая уравнением

$$z_{i0} - \frac{x_{i0}}{a_i} \cdot (e^{-a_i(t_i-t_{i0})} - 1) - c_i(t_i - t_{i0}) = d_i. \quad (5)$$

Лемма. Решение t_i уравнения (5) единственно при всех допустимых значениях параметров. При этом $t_i = t_i(a_i)$ – убывающая функция.

Доказательство. Для простоты обозначим $a_i = a$, $d_i = d$, $c_i = c$, $z_{i0} = z_0$, $x_{i0} = x_0$, $t_i - t_{i0} = t$. Тогда (5) можно записать в виде

$$h(t) \equiv z_0 - d - ct - \frac{x_0}{a} (e^{-at} - 1) = 0. \quad (6)$$

Докажем единственность решения t уравнения (6). Имеем: $\dot{h}(t) = -c + x_0 e^{-at}$. Тогда если $c \geq x_0$, то $\dot{h}(t) < 0$ при $t \geq 0$, и функция $h(t)$ убывает. Если $c < x_0$, то $\dot{h}(t)$ возрастает до максимума в точке $t^* = \frac{1}{a} \ln \frac{c}{x_0}$, а затем убывает. В обоих случаях, поскольку $h(0) = z_0 - d > 0$ и $\lim_{t \rightarrow \infty} h(t) = -\infty$, уравнение $h(t) = 0$ имеет единственное решение.

Докажем убывание решения $t(a)$ уравнения (6) как функции параметра a . Запишем (6) в виде $z_0 - d - ct = \frac{x_0}{a} (e^{-at} - 1) \equiv q(t, a)$. (7)

Пусть $t(a_1), t(a_2)$ – решения уравнения (6) при $a = a_1, a = a_2, a_1 > a_2$. Легко показать, что $\frac{dg}{da} > 0$ при $t > 0$. Тогда из (7) следует

$$z_0 - d - ct(a_1) = g(t(a_1), a_1) > \\ > g(t(a_2), a_2) = z_0 - d - ct(a_2),$$

откуда получаем, что $t(a_1) < t(a_2)$. Лемма доказана.

Поскольку $\bar{y}_i \in [y_{imin}; y_{imax}]$, $a_i \in [a_{imin}; a_{imax}]$, где a_{imin}, a_{imax} – значения параметра a , соответствующие y_{imin}, y_{imax} . Тогда решение $t_i(a_i)$ уравнения (5) в силу леммы удовлетворяет условию

$$t_i(a_{imax}) \leq t_i(a_i) \leq t_i(a_{imin}). \quad (8)$$

Пусть t_{i0}^k – время начала стадии химических превращений в i -м реакторе на k -й стадии; Δ^+ – время, затрачиваемое на осмотр и загрузку реактора; Δ^- – время, затрачиваемое на разгрузку реактора. Полагаем, что Δ^+, Δ^- одинаковы для всех реакторов на всех стадиях, что не уменьшает общности дальнейших рассуждений. Пусть k -я стадия для i -го реактора начинается в момент времени $t_{i0}^k - \Delta^+$, а заканчивается в момент времени $t_{i0}^k + \Delta^-$, где t_{i0}^k – время окончания этапа химических превращений. Для безопасного функционирования системы реакторов, то есть для отсутствия ситуации одновременной разгрузки более одного реактора, достаточно, чтобы на k -й стадии реакторы с меньшими номерами разгружались раньше, то есть чтобы выполнялись условия $t_{i0}^k + \Delta^- < t_{i+1}^k, i = 1, \dots, n-1$, а реакторы с меньшими номерами, вышедшие на $(k+1)$ -стадию, должны разгружаться позже реакторов, находящихся на k -й стадии, что равносильно условиям $t_{j+1}^k + \Delta^- < t_j^{k+1}, j = 1, \dots, n-1$.

Будем обозначать через $x_{i0}^k, y_{i0}^k, \bar{y}_i^k, x_{i0}^k, x_i^k, a_i^k$ значения величин через $x_{i0}, y_{i0}, \bar{y}_i, x_{i0}, x_i, a_i$ соответственно на k -й стадии. Тогда из предыдущих рассуждений получаем следующий результат.

Теорема. Пусть система неравенств

$$t_i^k(a_{imax}) \leq t_i^k \leq t_i^k(a_{imin}), t_j^k + \Delta^- < t_{j+1}^k, \\ i = 1, 2, \dots, n, k = 1, 2, \dots, N, j = 1, \dots, n-1, \\ t_{j+1}^k + \Delta^- < t_j^{k+1}, j = 1, \dots, n-1, k = 1, 2, \dots, N-1$$

имеет решение $t_1^k, \dots, t_n^k$. Тогда группа периодических реакторов, объединенных в технологическую линию, будет иметь безопасный режим функционирования, который можно поддержи-

вать с помощью управления $y_{i0}^k = \bar{y}_i^k - \frac{a_i^k x_i^k(t)}{\mu_i}$.

Устойчивость. Найдем условия устойчивости решения $\bar{x}_i = x_i(t) = x_{i0} e^{-a_i(t-t_{i0})}, y_i = \bar{y}_i$ системы (2). В соответствии с [1], где в качестве функции Ляпунова была взята квадратичная форма, достаточные условия асимптотической устойчивости решения, реализующего изотермический режим в реакторе, состоят в существовании таких постоянных α, β , что

$$p\alpha^2 + 2q\alpha\beta + r\beta^2 < 0, \alpha > 0, \beta > 0, \quad (9)$$

$$\text{где } p = \frac{a_i \bar{x}_i^2}{\bar{y}_i^2}, q = \frac{a_i \bar{x}_i}{\bar{y}_i^2} - 2\mu_i, r = \frac{a_i}{\bar{y}_i^2}.$$

При этом неясно, могут ли условия (9) выполняться одновременно, поэтому продолжим исследование устойчивости. Для выполнения первого условия (9) достаточно, чтобы одновременно были справедливы неравенства

$$q^2 - pr \geq 0, -q + \sqrt{q^2 - pr} > 0,$$

что равносильно выполнению неравенств $q < 0, q^2 - pr \geq 0$.

Отсюда получаем, что $\mu_i \geq x_{i0} \bar{y}_i^2 \cdot e^{-\frac{1}{y_i}}$. Поскольку, как нетрудно показать, правая часть последнего неравенства, как функция от $\bar{y}_i$, имеет глобальный максимум при $\bar{y}_i = 1$, достаточным условием для выполнения последнего неравенства является $\mu_i > x_{i0} \cdot e^{-1}$.

ВЫВОДЫ

Предложен подход к решению задачи управления группой варочных реакторов. Предложена соответствующая математическая модель, основанная на системе с переменной структурой. При этом учитывается динамика процесса варки, для описания которой использованы простейшие уравнения. В дальнейшем следует разработать алгоритм управления, включающий в динамическую систему большее число параметров процесса варки.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Вольтер Б. В., Сальников И. Е. Устойчивость режимов работы химических реакторов. М.: Химия, 1981. 200 с.
2. Зорин И. Ф., Петров В. П., Рогульская С. А. Управление процессами целлюлозно-бумажного производства. М.: Лесн. пром-сть, 1981. 272 с.
3. Казанский В. Н., Зорин И. Ф., Петров В. П. Централизованное управление группой периодических варочных реакторов // Автоматизация, механизация, приборное и аппаратное оформление процессов целлюлозно-бумажного производства: Сб. тр. ВНИИБ. Вып. 71. Л., 1977. С. 18–24.
4. Кириллов А. Н. Метод динамической декомпозиции в моделировании систем со структурными изменениями // Информационно-управляющие системы. 2009. № 1. С. 20–24.
5. Branicky M. S., Borkar V. S., Mitter S. K. A Unified Framework for Hybrid Control: Model and Optimal Control Theory // IEEE Transactions on Automatic Control. 1998. Vol. 43. № 4. P. 475–482.
6. Nerode A., Kohn W. Models for Hybrid Systems: Automata, Topologies, Controllability, Observability // Lecture Notes in Control and Information Sciences. Springer. 1993. № 736. P. 317–356.

НИНА ВЛАДИМИРОВНА ПЛАКСИНА

аспирант кафедры теории вероятностей и анализа данных
математического факультета, Петрозаводский государственный университет
plaksina_nv@mail.ru

РАВНОВЕСНЫЕ ЦЕНЫ ДЛЯ ПРОВАЙДЕРОВ В СИСТЕМЕ С ОЧЕРЕДЯМИ

Статья посвящена исследованию модели системы очередей. В модели предполагается существование двух подсистем М/М/1 и предоставление двух разных сервисов (продуктов). Эти сервисы являются дополнительными, и пользователю нет смысла получать только один из них. В статье определены равновесные цены и доходы провайдеров в зависимости от времени обслуживания.

Ключевые слова: теория игр, теория очередей, дополнительный продукт, равновесные цены

ВВЕДЕНИЕ

Конкуренция среди сервисов, предлагающих свои услуги, является предметом исследования в ряде работ, например [3]. Модель, описывающая такую ситуацию, состоит из двух этапов. Сначала для любого множества цен, установленных провайдерами, пользователи выбирают сервисы согласно какому-то правилу. Учитывая эту информацию, провайдеры назначают цены, и достигается равновесие [2].

В данной работе проведено исследование «системы очередей с дополнительной услугой», в которой у одного из провайдеров появляется конкурент, то есть у пользователей возникает возможность выбора. В этом состоит отличие от рассмотренной ранее модели [4].

В качестве примера к задаче рассмотрен парковочный сервис. Пользователь паркует свою машину на стоянке, чтобы затем воспользоваться услугами другого сервиса. Согласно этому примеру, провайдер, который предоставляет место на парковке, – «parking-provider» (далее – «парковщик»), а другой – «service-provider» (далее – «сервис»). Схематически данная модель представлена на рисунке.

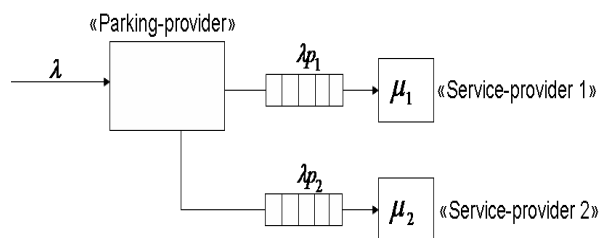


Схема поступления заявок в систему

Здесь λ – интенсивность входного потока пользователей, μ – время обслуживания отдельного требования, p_1 – вероятность того, что пользователь решит воспользоваться услугами первого сервиса, p_2 – второго, $p_1 + p_2 = 1$.

В работе исследуется равновесное решение модели. Проведен анализ двух ценовых ситуаций и изменений доходов провайдеров в них. Также определены критерии, которые влияют на выбор пользователя.

МОДЕЛЬ

Будем рассматривать случай, когда провайдеры хотят максимально увеличить свою прибыль. Когда пользователь прибывает в систему, он решает, услугами какого сервиса ему воспользоваться. Если ожидаемый доход пользователя больше нуля, провайдеры увеличивают цены (чтобы при этом количество пользователей не сократилось) до тех пор, пока этот доход не станет равным нулю.

Прежде чем приступить к решению задачи, введем некоторые предположения.

1. Стационарный Пуассоновский поток пользователей с параметром Λ прибывает на серверную станцию. Все пользователи идентичны, различно только время их прибытия. Λ – интенсивность, которая необходима для того, чтобы сервис существовал, это необязательно действительная интенсивность входного потока пользователей (которая дальше будет определена как λ).

2. Время обслуживания отдельного требования (заявки пользователя) – экспоненциально распределенная случайная величина с параметром μ , независимая от совокупности моментов событий входящего потока и времен обслуживания других требований.

3. При удачном завершении сервиса каждый пользователь получает доход R (доход выражается в денежных единицах).

4. Стоимость единицы времени пребывания в системе для пользователя равна C .

5. У пользователей нет предпочтений при выборе провайдера. Их цель – сократить расходы при получении сервиса.

6. Предполагается, что пользователь решает присоединиться к очереди или нет, если никто

другой не присоединяется (когда он платит только за время своего обслуживания), то есть $R \geq \frac{C}{\mu}$.

7. Когда пользователь хочет получить сервис, он не знает размер очереди. Решение о том, присоединиться к очереди или нет, он принимает безвозвратно.

Будем рассматривать систему, которая состоит из двух подсистем М/М/1 [1]. Эта система с неограниченной очередью, все заявки обслуживаются в порядке поступления.

Используем следующие обозначения: λ – интенсивность входного потока, $\lambda = \lambda_1 + \lambda_2$, $\lambda_1 = \lambda p_1$, $\lambda_2 = \lambda p_2$; λ^* – естественное равновесие; i – номер сервиса, $i = 1, 2$; $\omega_i = \omega_i(\lambda_i)$ – ожидаемое время пребывания пользователя в системе, учитывая интенсивность поступления λ_i , $\omega_i = \frac{1}{\mu - \lambda_i}$; P_{Si} –

цена, назначенная сервисом i ; P_N – цена за 1 минуту, назначенная парковщиком; U – ожидаемая прибыль присоединившегося пользователя, воспользовавшегося сервисом i , $U = R - P_{Si} - \omega_i P_N - \omega_i C$; π_{Si} – ожидаемая прибыль за единицу времени для сервиса i , $\pi_{Si} = \lambda_i P_{Si}$; π_N – ожидаемая прибыль за единицу времени для парковщика, $\pi_N = (\lambda_1 \omega_1 + \lambda_2 \omega_2) P_N$.

Далее рассмотрим модель с фиксированным значением p_i , $i = 1, 2$. Разберем два случая: симметричный, когда значение μ одинаково для обоих сервисов, и несимметричный, когда это значение различно.

СИММЕТРИЧНЫЙ СЛУЧАЙ

Пусть $\lambda^* = 2 \left(\mu - \sqrt[3]{\frac{\mu^2 C}{R}} \right) \leq \Lambda$. Если $\lambda^* > \Lambda$, то часть

заявок не будет обслужена и покинет систему.

Теорема 1.

Существует единственное положение равновесия, где $\lambda = \lambda^*$,

$$\omega_1 = \omega_2 = \frac{1}{\mu(1-2p_1) + 2p_1 \sqrt[3]{\frac{\mu^2 C}{R}}}, \quad P_{S1} = P_{S2} = R - \sqrt[3]{\frac{CR^2}{\mu}},$$

$$P_N = \sqrt[3]{\mu C^2 R} - C, \quad \pi_{S1} = \pi_{S2} = 2p_1 \left(\sqrt{R\mu} - \sqrt[6]{RC^2 \mu} \right)^2,$$

$$\pi_N = \frac{4p_1 (\sqrt[3]{\mu C^2 R} - C)}{\mu(1-2p_1) + 2p_1 \sqrt[3]{\frac{\mu^2 C}{R}}}.$$

Доказательство. В равновесии для пользователей должно быть выполнено:

$$R = P_{Si} + \omega_i P_N + \omega_i C \text{ или } R = P_{Si} + (P_N + C) \frac{1}{\mu - \lambda p_i},$$

где $i = 1, 2$. Отсюда можно выразить интенсивность входного потока через цены на обслуживание клиентов:

$$\lambda p_i = \mu - \frac{P_N + C}{R - P_{Si}}. \quad (1)$$

Заметим, что для того чтобы $\lambda p_i \geq 0$, должно выполняться условие: $\mu P_{Si} + P_N \leq \mu R - C$. Несложно проверить, что выполнение данного условия для равновесных цен (6) и (7) эквивалентно предположению 6.

Используя (1) и определения π_{S1} , π_{S2} , π_N , получим:

$$\pi_{Si} = \lambda p_i P_{Si} = P_{Si} \left(\mu - \frac{P_N + C}{R - P_{Si}} \right) \quad (2)$$

и

$$\begin{aligned} \pi_N = (\lambda p_1 \omega_1 + \lambda p_2 \omega_2) P_N = P_N \left[\left(\mu - \frac{P_N + C}{R - P_{S1}} \right) \frac{R - P_{S1}}{P_N + C} + \right. \\ \left. + \left(\mu - \frac{P_N + C}{R - P_{S2}} \right) \frac{R - P_{S2}}{P_N + C} \right]. \end{aligned} \quad (3)$$

Максимизируем π_{Si} по отношению к P_{Si} и π_N по отношению к P_N , получаем стратегии

$$P_{S1} = P_{S2} = R - \sqrt{\frac{R}{\mu} (P_N + C)} \quad (4)$$

и

$$P_N = \sqrt{\frac{C\mu}{2} (2R - P_{S1} - P_{S2})} - C. \quad (5)$$

$$\text{Стратегии } P_{S1} = P_{S2} = R + \sqrt{\frac{R}{\mu} (P_N + C)},$$

$P_N = -\sqrt{\frac{C\mu}{2} (2R - P_{S1} - P_{S2})} - C$ не удовлетворяют условиям задачи.

Получаем

$$P_{S1} = P_{S2} = R - \sqrt[3]{\frac{CR^2}{\mu}} \quad (6)$$

и

$$P_N = \sqrt[3]{\mu C^2 R} - C. \quad (7)$$

Нетрудно проверить, что π_{S1} , π_{S2} , π_N принимают максимальные значения в P_{S1} , P_{S2} , P_N соответственно. Подставляя (6) и (7) в уравнения (1)–(3), получаем:

$$\lambda p_1 = \lambda p_2 = \mu - \sqrt[3]{\frac{\mu^2 C}{R}}, \quad p_1 = p_2.$$

Соответственно:

$$\lambda = \lambda p_1 + \lambda p_2 = 2 \left(\mu - \sqrt[3]{\frac{\mu^2 C}{R}} \right), \quad (8)$$

$$\lambda_1 = \lambda_2 = 2p_1 \left(\mu - \sqrt[3]{\frac{\mu^2 C}{R}} \right),$$

$$\omega_1 = \omega_2 = \frac{1}{\mu(1-2p_1) + 2p_1 \sqrt[3]{\frac{\mu^2 C}{R}}}, \quad (9)$$

$$\pi_{S1} = \pi_{S2} = 2p_1 \left(\sqrt{R\mu} - \sqrt[6]{RC^2 \mu} \right)^2, \quad (10)$$

$$\pi_N = \frac{4p_1(\sqrt[3]{\mu C^2 R} - C)}{\mu(1 - 2p_1) + 2p_1\sqrt[3]{\frac{\mu^2 C}{R}}}. \quad (11)$$

Полученные результаты показывают, что на стоимость услуг сервисов никак не влияют p_1, p . Значение p_i влияет только на конечную прибыль сервисов.

Для парковщика выгодно появление второго сервиса, так как увеличивается количество пользователей в системе, соответственно, доход парковщика также растет. Пользователям это также выгодно, так как у них появляется возможность выбора, а время их пребывания в системе может сократиться. При этом большее количество пользователей могут воспользоваться услугами.

НЕСИММЕТРИЧНЫЙ СЛУЧАЙ

Допустим, что интенсивность обработки заявок у сервисов различна. Посмотрим, как изменится стоимость услуг в данном случае.

$$\text{Пусть } \lambda^* = \mu_1 + \mu_2 - \sqrt[3]{\frac{C}{2R} [\sqrt{\mu_1} + \sqrt{\mu_2}]^{\frac{4}{3}}} \leq \Lambda.$$

Теорема 2.

Существует единственное положение равновесия, где $\lambda = \lambda^*$,

$$\omega_i = \frac{1}{\mu_i - p_i \left(\mu_1 + \mu_2 - \sqrt[3]{\frac{C}{2R} [\sqrt{\mu_1} + \sqrt{\mu_2}]^{\frac{4}{3}}} \right)},$$

$$P_N = \sqrt[3]{\frac{C^2}{4} [\sqrt{\mu_1 R} + \sqrt{\mu_2 R}]^2} - C,$$

$$P_{Si} = R - \sqrt{\frac{R}{\mu_i}} \sqrt[3]{\frac{C^2}{4} [\sqrt{\mu_1 R} + \sqrt{\mu_2 R}]^2}.$$

$$\pi_{Si} = p_i \left[R - \sqrt{\frac{R}{\mu_i}} \sqrt[3]{\frac{C^2 R}{4} [\sqrt{\mu_1} + \sqrt{\mu_2}]^2} \right] \times \\ \times \left(\mu_1 + \mu_2 - \sqrt[3]{\frac{C}{2R} [\sqrt{\mu_1} + \sqrt{\mu_2}]^{\frac{4}{3}}} \right),$$

$$\pi_N = \left[\sqrt[3]{\frac{RC^2}{4} [\sqrt{\mu_1} + \sqrt{\mu_2}]^2} - C \right] \times \\ \times \left[-2 + \sum_{i=1}^2 \frac{\mu_i}{\mu_i - p_i \left(\mu_1 + \mu_2 - \sqrt[3]{\frac{C}{2R} [\sqrt{\mu_1} + \sqrt{\mu_2}]^{\frac{4}{3}}} \right)} \right].$$

Доказательство теоремы 2 проводится по аналогии с доказательством теоремы 1. Разница в том, что теперь у каждого сервиса свое время обслуживания отдельного требования, то есть в данном случае $\mu_1 \neq \mu_2$.

Полученные результаты подтверждают, что на стоимость услуг значительно влияет интенсивность обработки заявок; чем выше это значение, тем стоимость услуг у сервисов выше, и наоборот. Соответственно, и доход сервисов может возрасти, если количество пользователей не сократится. Доходы парковщика не уменьшатся в силу того, что количество пользователей возрастет. Стоимость услуг парковщика может сократиться в силу изменения количества пользователей. Однако первому сервису невыгодно появление конкурента, так как теперь, чтобы поток пользователей не сократился, необходимо или понижать цену, или наращивать мощность сервера. При этом доход сервиса теперь зависит от мощности сервера конкурента, а борьба за цены разворачивается между тремя провайдерами. Это не всегда бывает выгодно сервису.

У пользователей появляется возможность выбора: либо пользоваться услугами более дорогого сервиса, либо более дешевого, но при этом больше платить парковщику. Однако распределение пользователей по каналам p_1, p_2 по-прежнему не влияет на уровень цен. Значение p_i влияет только на конечную прибыль сервисов; чем выше это значение, тем выше их доход. Причем в зависимости от величины p_i прибыль сервиса i может быть как больше, так и меньше, чем в условиях монополии [4]. Однако в таком случае очередь из пользователей возрастает, увеличивается время обслуживания и нагрузка на сервер также растет.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Было проведено исследование модели конкурентной борьбы между сервисами. Рассмотрены две ценовые ситуации и определено, как выбор пользователей зависит от стоимости услуг провайдеров. Также найдены равновесные цены для сервисов и, соответственно, их доходы. Проведено сравнение полученных результатов с моделью без конкуренции; подтверждено, что появление второго сервиса выгодно пользователям и невыгодно первому сервису.

БЛАГОДАРНОСТЬ

Выражаю благодарность профессору В. В. Мазалову за постановку задачи и помощь при подготовке статьи.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ивченко Г. И., Каштанов В. А., Коваленко И. Н. Теория массового обслуживания. М.: Высш. шк., 1982. 256 с.
2. Петросян Л. А., Зенкевич Н. А., Семина Е. А. Теория игр. М.: Высш. шк., 1998. 304 с.
3. Hassin R., Haviv M. Equilibrium of Customers Behavior in Queueing Systems: To Queue or Not to Queue. Boston: Kluwer, 2003.
4. Veltman A., Hassin R. Equilibrium in Queueing Systems with Complementary Products // Queueing Systems, Netherlands: Springer Science + Business Media, 2005. P. 325–342.

ВЛАДИМИР ВАСИЛЬЕВИЧ ВАПИРОВ

доктор химических наук, профессор, заведующий кафедрой общей химии эколого-биологического факультета, Петрозаводский государственный университет
vapirova@petrsu.ru

ОЛЬГА ВЛАДИМИРОВНА СЕРГЕЕВА

кандидат физико-математических наук, доцент кафедры общей физики физико-технического факультета, Петрозаводский государственный университет
osergeeva@petrsu.ru

НАДЕЖДА ВЛАДИМИРОВНА ВАПИРОВА

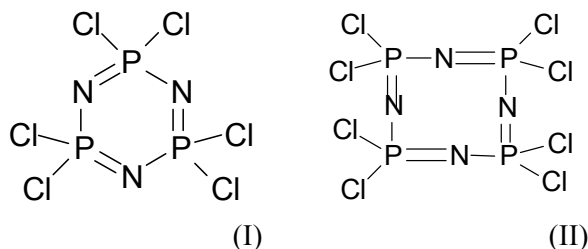
доцент кафедры общей химии эколого-биологического факультета, Петрозаводский государственный университет
nadin@petrsu.ru

ИССЛЕДОВАНИЕ КИНЕТИКИ РЕАКЦИИ ГЕКСАХЛОРИЦИКЛОТРИФОСФАТРИЕНА С О-НУКЛЕОФИЛАМИ

Исследованы кинетические и термодинамические закономерности реакции гексахлорциклотрифосфатриена с 4-метилпиридин-N-оксидом в полярном и неполярном растворителях. Реакция протекает по механизму $S_N2(P)$ замещения.

Ключевые слова: фосфазен, химическая кинетика, механизмы реакции, скорость реакции

Объектом данного исследования является циклический тример фосфонитрилхлорида – гексахлорциклотрифосфатриен (фосфазен), структура которого представлена формулой I.



Для фосфонитрилгалогенидов характерны как линейные, полимерные, так и циклические структуры, однако наибольший интерес в теоретическом и прикладном аспектах вызывают циклические тример I и тетрамер II.

Широкое применение фосфазенов в различных областях производства связано с их особыми физическими свойствами. Так, специфические оптические свойства этих соединений обуславливают перспективу их использования в разработке изделий электронной техники и оптоэлектроники. Данное направление отражено в оригинальных работах [2], [9], [12], [13]. Незамещенные циклофосфазены и полифосфазены являются оптически прозрачными материалами при длинах волн выше 220 нм. Оптические и фотохимические характеристики при больших длинах волн определяются оптическими и фотохимическими свойствами заместителей у атома фосфора. Это позволяет отнести фосфазены к идеальным фотохимическим материалам, кото-

рые могут служить основой для получения новых веществ с особыми оптическими характеристиками. На основе полифосфазенов создаются материалы с нелинейными оптическими свойствами, а также фольгированные диэлектрики, которые могут быть использованы для получения подложек печатных плат [4].

Не менее перспективными являются материалы, получаемые на основе полимерных органофосфазенов. Такие производные легко образуют комплексы с катионами многих металлов, которые обладают ионной проводимостью до 10^{-3} – 10^{-5} Ом $^{-1}$ ·см $^{-1}$, что превышает проводимость комплексов на основе полиэфиров более чем в 100 раз [7], [8], [11], [14]. Перечисленные свойства предполагают использование производных фосфазенов в качестве твердых электролитов и ионных проводников в электрохромных приборах.

Результаты по исследованию электрической проводимости соли, полученной на основе гексахлорциклотрифосфатриена и 4-метилпиридин-N-оксида, позволили установить характер переноса заряда в этом соединении, который реализуется по двум механизмам – электронному и ионному, с энергиями активации соответственно 0,51 и 1,68 эВ. При этом температурный интервал, в котором доминирует ионный механизм зарядопереноса в соли, расширяется по сравнению с исходным фосфазеном на 20 °С [6].

Особого внимания заслуживает вопрос использования фосфазенов как активаторов свободных карбоновых кислот. Это направление является особенно перспективным в области тонкой химической технологии. Циклофосфазены могут быть использованы в качестве акти-

ваторов, что позволяет вести процессы синтеза сложных эфиров и амидов с участием свободных карбоновых кислот.

По своему химическому составу соединение I является неорганическим, однако планарность фосфонитрильного кольца, эквивалентность по длине всех связей PN и формальное соответствие правилу Хюккеля делает это соединение близким по реакционной способности к органическим соединениям. Важным отличием в электронной структуре фосфазена от классических ароматических соединений является участие d-орбиталей фосфора в делокализации электронной плотности, что сказывается на особенностях реакционной способности.

Оптимизация режимов получения новых материалов с заданными свойствами возможна на основании данных по реакционной способности и механизмам химического процесса. В этой связи актуальным является исследование механизма реакции фосфазена с ароматическими N-оксидами, которые могут выступать в качестве активаторов или катализаторов процессов получения производных фосфазенов.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Гексахлорциклотрифосфазатриен синтезирован и очищен, как указано в [1], где в качестве катализатора процесса использовался N-оксид пиридина. N-оксид 4-метилпиридина синтезирован и очищен по методике, указанной в [10]. Растворители ацетонитрил и бензол очищены, как указано в [3]. Для получения сухого растворителя бензол после осушки над металлическим натрием пропускали через колонку со свежепрокаленным оксидом алюминия.

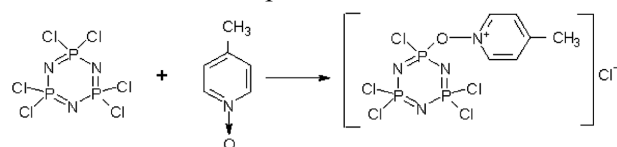
Контроль за скоростью процесса осуществлялся спектрофотометрически на приборе СФ-2000.

Для установления начальных значений скорости реакции использовали данные экспериментальной кинетической кривой, по которым устанавливалась аналитическая зависимость закона изменения концентрации от времени. Дифференцированием полученной функциональной зависимости определяли значение скорости в начальный момент времени.

Величины энергии активации ($E^\ddagger$) и энтропии активации ($\Delta S^\ddagger$) рассчитывали по уравнению Аррениуса.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И ОБСУЖДЕНИЕ

Реакция фосфазена с 4-метилпиридин-N-оксидом может быть представлена схемой:



В результате данного процесса возможна разная степень замещения галогена, однако исследование кинетики проводилось в условиях псевдомономолекулярности при $[N_3P_3Cl_6] \gg \gg [CH_3C_5H_4NO]$, что обеспечивает замещение одного хлора.

Начальные скорости реакции в бензоле и ацетонитриле линейно зависят от концентрации фосфазена, что свидетельствует о первом порядке по данному реагенту в полярном и неполярном растворителях. Зависимости начальных скоростей реакции от концентрации N-оксида в ацетонитриле в температурном интервале 283–313 К также являются линейными (рис. 1), что подтверждает первый порядок реакции по N-оксиду.

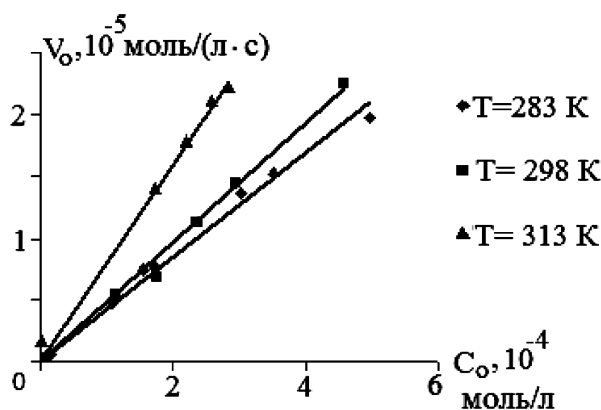


Рис. 1. Зависимость начальной скорости реакции V_0 от начальной концентрации N-оксида-4-метилпиридина при концентрации фосфазена 0,003 моль/л в ацетонитриле при различных температурах

Полученные экспериментальные данные исследуемой реакции в ацетонитриле соответствуют следующему уравнению скорости:

$$\frac{d[CH_3 - C_5H_4NO]}{dt} = k[N_3P_3Cl_6] \cdot [CH_3 - C_5H_4NO].$$

Активационные параметры реакции в ацетонитриле в исследуемом температурном интервале составляют $E^\ddagger = 11,8 \pm 0,8$ кДж/моль, $\Delta S^\ddagger = 188 \pm 14$ Дж/(моль · К).

Зависимость начальной скорости реакции от концентрации N-оксида в бензоле является нелинейной (рис. 2), а скорость процесса описывается уравнением

$$\frac{d[CH_3 - C_5H_4NO]}{dt} = k_1[N_3P_3Cl_6] \cdot [CH_3 - C_5H_4N_{10}] + k_2[N_3P_3Cl_6] \cdot [CH_3 - C_5H_4NO]^2.$$

Это указывает на участие второй молекулы N-оксида в скорость-определяющей стадии. Принимая во внимание, что одновременное замещение более одного галогена в фосфазене в условиях псевдомономолекулярности маловероятно, наиболее реальной представляется активирующая роль N-оксида пиридина на процесс замещения.

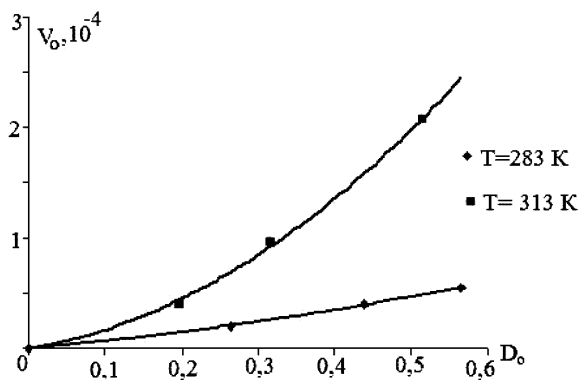
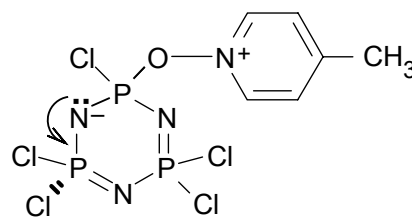


Рис. 2. Зависимость начальной скорости реакции V_0 от начальной оптической плотности D N-оксида-4-метилпиридина при концентрации фосфазена 0,1 моль/л в бензоле при различных температурах

В соответствии с экспериментальными данными, в полярном растворителе, способном сольватировать полярное переходное состояние, наиболее вероятным представляется механизм замещения $S_N2(P)$, близкий к синхронному для атома углерода, что подтверждается значениями активационных параметров.

В неполярном растворителе сольватация полярного переходного состояния со стороны растворителя минимальна, что, по-видимому, приводит к изменению механизма замещения. Гетероароматические N-оксиды вследствие доступности реакционного центра и локализации отрицательного заряда на атоме кислорода спо-

собны к проявлению супернуклеофильных свойств. В этой связи пара электронов на кислороде может быть акцептирована одной из вакантных d-орбиталей фосфора, что может приводить к образованию комплекса π , ν типа. За равновесной стадией комплексообразования следует отщепление галогена в скорость-определяющей стадии, что определяется уравнением скорости первого порядка. Вместе с этим в образовавшемся комплексе отрицательный заряд частично делокализован по кольцу, что с, одной стороны, приводит к уменьшению электрофильности других атомов фосфора, с другой – способствует диссоциации связи P-Cl.



В результате этого в комплексе при соседнем атоме фосфора связь P-Cl становится более полярной, что облегчает атаку нуклеофилом одного из соседних атомов фосфора. Таким образом, в данном процессе проявляются известные свойства гетероароматических N-оксидов как сильных нуклеофилов, так и активных электронодоноров, стабилизирующих полярное переходное состояние, что приводит к активации замещения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Вапиров В. В. Реакционная способность гексахлорциклотрифосфазатриена в реакциях нуклеофильного замещения: Дис. ... д-ра хим. наук. Петрозаводск, 2000. 384 с.
2. Виноградова С. В., Тур Д. Р., Васнев В. А. Полиорганотрифосфазены с открытой цепью. Синтез и свойства // Успехи химии. 1998. Т. 67. № 6. С. 573–594.
3. Гордон Дж., Форд Р. Спутник химика. М.: Мир, 1976. 541 с.
4. Гроздов А. Г., Степанов Б. Н., Шестаков А. К., Чалмаев В. А., Бурочкин Ю. В., Ломоносов А. В. Способ получения самозатухающих слоистых пластиков. Патент Российской Федерации № 2071424. 10.01.1997.
5. Живухин С. М., Толстогузов В. Б., Левицкий М. М. О синтезе фосфонитрилхлорида // Журнал неорганической химии. 1961. Т. 6. Вып. 10. С. 2414–2416.
6. Сергеева О. В. Электронные и оптические свойства фосфазена и его производных: Дис. ... канд. физ.-мат. наук. Петрозаводск, 1999. 173 с.
7. Allcock H. R., Ravikiran R., O'Connor S. J. M. Effect of oligo(ethyleneoxy)cyclotriphosphazenes, tetraglyme and other small molecules on the ionic conductivity of the poly[bis(methoxy-ethoxy)phosphazene] (MEEP)/lithium triflate system // Macromolecules. 1997. Vol. 30. P. 3184–3190.
8. Brusatin G., Guglielmi M., De Jaeger R., Facchin G., Gleria M., Musiani M. Sol-gel hybrid materials based on hydroxylated poly[bis(methoxy-ethoxy-ethoxy)phosphazene] and silica: a ceramic ionic conductor // J. of Material Science. 1997. Vol. 32. P. 4415–4420.
9. Fantin G., Fogagnolo M., Medici A., Pedrini P., Gleria M., Minto F. Fotosensitive phosphazene substrates: synthesis and characterization // Gazzetta Chimica Italiana. 1997. Vol. 127. P. 287–292.
10. Katritzky A. R., Simmons P. Interaction at a distance in conjugated systems. Part I. The basities of (Amino- and nitrophenyl) – pyridines and pyridine 1-oxides // J. Chem. Soc. 1960. Vol. 34. P. 1511–1516.
11. Morales E., Acosta J. L. Thermal and electrical characterization of plasticized polymer electrolytes based on polyethers and polyphosphazene blends // Solid State Ionics. 1997. Vol. 96. P. 99–106.
12. Olshavsky M. A., Allcock H. R. Polyphosphazenes that Exhibit High Refractive Indices: Synthesis, Characterization, and Optical Effects // Macromolecules. 1995. Vol. 28. 6188–6193.
13. Olshavsky M., Allcock H. R. Polyphosphazenes with high refractive indices: optical dispersion and molar refractivity // Macromolecules. 1997. Vol. 30. P. 4179–4183.
14. Zurer P. Polymer solid electrolytes eyed for high-energy-density batteries // Chem. and Engineering news. 1984. Vol. 62. № 45. P. 23–24.

ВАЛЕРИЙ ИВАНОВИЧ СЫСУН

доктор физико-математических наук, профессор кафедры электроэнергетики и электроники физико-технического факультета, Петрозаводский государственный университет
vsysun@psu.karelia.ru

ВЛАДИМИР СТАНИСЛАВОВИЧ ИГНАХИН

аспирант кафедры электроники и электроэнергетики физико-технического факультета, Петрозаводский государственный университет
art101@mail.ru

К РАДИАЛЬНОЙ ТЕОРИИ ИОННОГО ТОКА НА ЗОНД: I. УЧЕТ ОБЪЕМНОЙ ИОНИЗАЦИИ

В настоящей работе рассматривается ионный ток на сферический и цилиндрический зонды с учетом ионизации в области возмущения плазмы. В предположении нулевой температуры ионов (приближение радиального дрейфа) получено выражение для ионной концентрации с учетом генерации ионов. Вычислены вольт-амперные характеристики зондов для широкого диапазона параметров (размер зонда, частота ионизации). Получены аппроксимирующие выражения для зависимостей плотности ионного тока на зонд от частоты ионизации.

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 была предложена в работе [8] и развивалась в последующем в [9], [13], [15], [17]. Приближение радиального дрейфа наиболее применимо в том случае, когда ионная температура T_i близка к нулю (ионы обладают незначительным моментом количества движения) и выполняется приближение бесстолкновительного движения. При этом даже редкие столкновения ионов с атомами разрушают орбитальное движение частиц и сильно влияют на величину ионного тока [1], [7]. Вследствие этого радиальная теория дает лучший результат при наличии столкновений, чем более строгая орбитальная теория [11], [16].

В радиальной теории пренебрегается орбитальным моментом ионов (полагается $T_i / T_e = 0$, 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 [8]. Ионный ток задается на бесконечности, а ионизацией в объеме пренебрегается. Концентрация электронов предполагается распределенной по бoльцмановскому закону $n_e = n_0 \exp(\frac{e\varphi}{kT_e})$, где n_0 – концентрация невозмущенной плазмы. Тогда уравнение Пуассона для цилиндрического и сферического случаев соответственно запишется:

$$\frac{1}{r} \frac{d}{dr} \left(r \frac{d\varphi}{dr} \right) = -\frac{e}{\varepsilon_0} \left[\frac{I_z}{2\pi l_s e \sqrt{-2e\varphi/M}} - n_0 \exp\left(\frac{e\varphi}{kT_e}\right) \right], \quad (1)$$

$$\frac{1}{r^2} \frac{d}{dr} \left(r^2 \frac{d\varphi}{dr} \right) = -\frac{e}{\varepsilon_0} \left[\frac{I_z}{4\pi r^2 e \sqrt{-2e\varphi/M}} - n_0 \exp\left(\frac{e\varphi}{kT_e}\right) \right]. \quad (2)$$

При заданном ионном токе I_z эти уравнения интегрировались численно [9], [13] 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 [15] 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.

Отсутствие учета объемной ионизации в радиальной теории требует увеличения области возмущения до бесконечности, в противном случае вся плазма конечных размеров уйдет на зонд. Кроме влияния на ионный ток конечное значение области возмущения плазмы зондом определяет пространственное разрешение метода. Ионизация в объеме учитывается в работах по пристеночному потенциалу, когда стенка интерпретируется как большой зонд. В основополагающей работе Тонкса и Ленгмюра [18] получено уравнение «плазма-слой»:

$$\nabla^2 \varphi = -\frac{e}{\varepsilon_0} \left\{ \frac{z}{r^\alpha} \int_0^r \frac{r'^{\alpha} n_0 \exp(\frac{e\varphi(r')}{kT_e}) dr'}{\sqrt{2e(\varphi(r') - \varphi(r))/M}} - n_0 \exp\left(\frac{e\varphi(r)}{kT_e}\right) \right\}, \quad (3)$$

здесь z – частота ионизации, производимой одним электроном, $\frac{r'^{\alpha}}{r^\alpha} z n_e(r') dr'$ – плотность потока ионов в точке r , родившихся в элементе dr' , где $\alpha = 0$ – плоский случай, $\alpha = 1$ – цилиндрический случай, $\alpha = 2$ – сферический случай.

Численные расчеты выполнены для области квазинейтральной плазмы, где принималось $n_i = n_e$. Результаты [18] показали, что учет генерации ионов приводит к возрастанию потенциа-

ла 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 [18] уточнялись в [10], [12], [14].

В [6] 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 иными граничными условиями: на внешней границе $r = r_0$ принималось $\varphi = 0$, $\frac{d\varphi}{dr} = 0$. В работе определяли зависимости плавающего потенциала зонда (пылевой частицы в плазме) и связанного с ней значения r_0 / λ_D от частоты ионизации. Столкновения с атомами не учитывались.

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 $r_0 / \lambda_D = 0,0001 \div 10$, $A = z / \omega_i = 0,02 \div 5$, 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. Для холодных ионов в радиальной теории это определение соответствует нулевой дрейфовой скорости ионов на границе области возмущения. В единице объема за единицу времени образуется $n_e z$ ионов. При этом 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:

$$dj = en_e(r')zdr'. \quad (4)$$

Все ионы доли плотности тока (4) будут иметь скорость $\sqrt{\frac{2e}{M}[\varphi(r') - \varphi(r)]}$. Разделив долю потока на скорость, получим долю концентрации dn' . Полные концентрация и плотность тока в точке r будут равны

$$n(r) = \frac{1}{r^\alpha} \int_r^{r_0} \frac{r'^\alpha n_e(r')zdr'}{\sqrt{\frac{2e}{M}[\varphi(r') - \varphi(r)]}}, \quad j(r) = \frac{e}{r^\alpha} \int_r^{r_0} n_e(r')zr'^\alpha dr'. \quad (5)$$

Введем безразмерные параметры:

$$x = \frac{r}{\lambda_D} = \frac{re}{\sqrt{\varepsilon_0 k T_e / n_0}}; \quad U = \frac{e\varphi}{k T_e}; \quad n' = \frac{n}{n_0}; \quad A = \frac{z\lambda_D}{\sqrt{k T_e / M}} = \frac{z}{\omega_i};$$

$j' = \frac{j}{en_0 \sqrt{k T_e / M}}$, здесь ω_i – плазменная ионная частота, j – плотность тока, λ_D – электронный дебаевский радиус.

Подставляя выражение (5) в уравнение Пуассона при больцмановском распределении концентрации электронов, получим в безразмерных величинах:

$$\frac{\partial^2 U}{\partial x^2} + \frac{\alpha}{x} \frac{\partial U}{\partial x} = \exp(U(x)) - \frac{A}{x^\alpha} \int_x^{x_0} \frac{x'^\alpha \exp(U(x')) dx'}{\sqrt{2[U(x') - U(x)]}}. \quad (6)$$

Решение (6) от границы области возмущения затруднено нулевыми начальными условиями для потенциала и его градиента. В [6] для начального от границы тонкого слоя, считающегося плоским, $\Delta x \ll x_0 = x_N$ получено приближенное аналитическое решение в предположении $n'_e = 1$; $n'_N = \text{const}$:

$$U(x) = (1 - n'_N) \frac{(x_N - x)^2}{2}, \quad (7)$$

$$n'_N = \frac{1}{3} + \sqrt[3]{\frac{1}{27} + \frac{B}{2} + \sqrt{\frac{B}{27} + \frac{B^2}{4}}} + \sqrt[3]{\frac{1}{27} + \frac{B}{2} - \sqrt{\frac{B}{27} + \frac{B^2}{4}}}, \quad (8)$$

где $B = \frac{A^2 \pi^2}{4}$. Однако при распространении решений (7, 8) на достаточно толстый слой плазмы, особенно при больших x_N , где $x'_N \rightarrow 1$, возникают неустойчивости счета. Ввиду этого методом последовательных приближений решение (7) было уточнено:

$$U(x) = (1 - n'_N) \frac{(x_N - x)^2}{2} (1 + \gamma \frac{x_N - x}{x_N}), \quad (9)$$

где $\gamma = \frac{1,363n'_N - 1}{1,818n'_N - 1,5}$ – для сферы и $\gamma = \frac{1,363n'_N - 1}{3,636n'_N - 3}$ – для цилиндра.

$$n'_{N-1} = n'_N \left[1 + \frac{h}{x_N} \left[1 - \frac{(2 + \gamma)}{\pi} \right] \right], \quad (10)$$

где 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 $U(x)$:

$$2U_x = 2U_j + a_j \left(\frac{x - x_j}{h} \right)^2 + b_j \frac{x - x_j}{h},$$

где $a_j = U_j - 2U_{j+1} + U_{j+2}$, $b_j = -3U_j + 4U_{j+1} - U_{j+2}$.

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. 1–5, $a = r_0 / \lambda_D$ – относительный размер зонда.

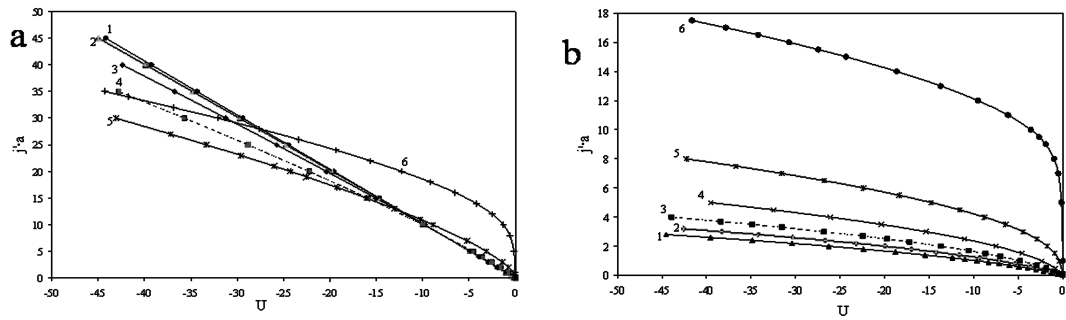


Рис. 1. Зависимости величины $j' \cdot a$ от безразмерного потенциала U в пренебрежении ионизацией (радиальная теория):
 а) сфера: 1 – $a = 0,0001$; 2 – $a = 0,001$; 3 – $a = 0,01$; 4 – $a = 0,1$; 5 – $a = 1,0$; 6 – $a = 10$;
 б) цилиндр: 1 – $a = 0,0001$; 2 – $a = 0,001$; 3 – $a = 0,01$; 4 – $a = 0,1$; 5 – $a = 1,0$; 6 – $a = 10$

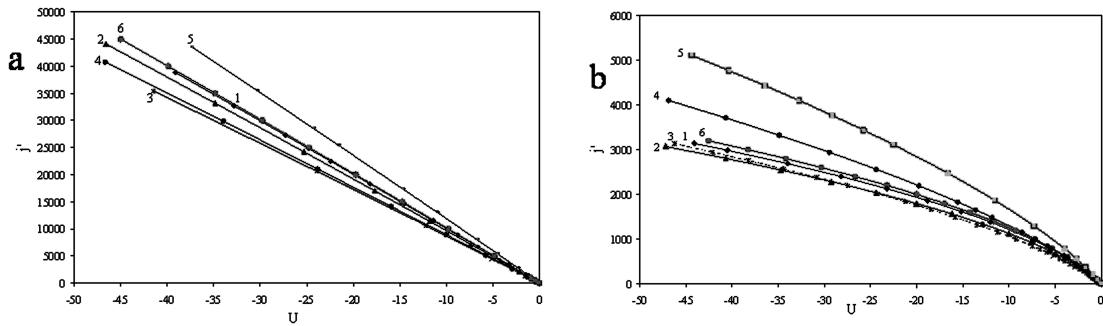


Рис. 2. Зависимости величины j' от безразмерного потенциала U для размера зонда $a = 0,001$:
 а) сфера: 1 – $A = 0,02$; 2 – $A = 0,1$; 3 – $A = 0,5$; 4 – $A = 1$; 5 – $A = 5$; 6 – радиальная теория без учета ионизации;
 б) цилиндр: 1 – $A = 0,02$; 2 – $A = 0,1$; 3 – $A = 0,5$; 4 – $A = 2$; 5 – $A = 5$; 6 – радиальная теория без учета ионизации

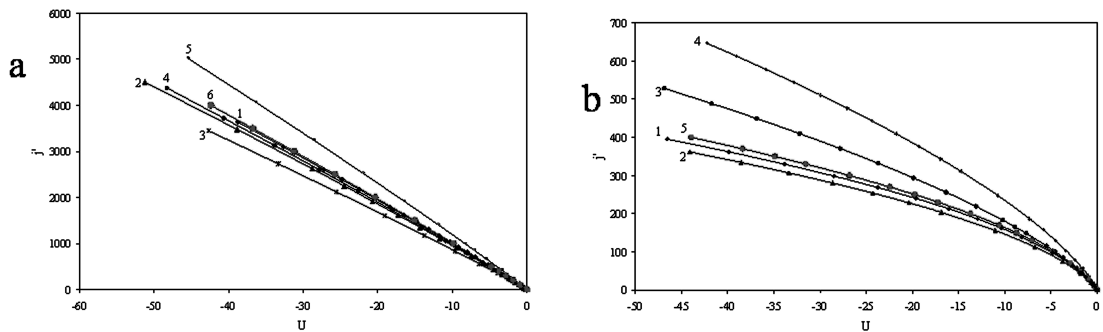


Рис. 3. Зависимости величины j' от безразмерного потенциала U для размера зонда $a = 0,01$:
 а) сфера: 1 – $A = 0,02$; 2 – $A = 0,1$; 3 – $A = 0,5$; 4 – $A = 2$; 5 – $A = 5$; 6 – радиальная теория без учета ионизации;
 б) цилиндр: 1 – $A = 0,02$; 2 – $A = 0,1$; 3 – $A = 2$; 4 – $A = 5$; 5 – радиальная теория без учета ионизации

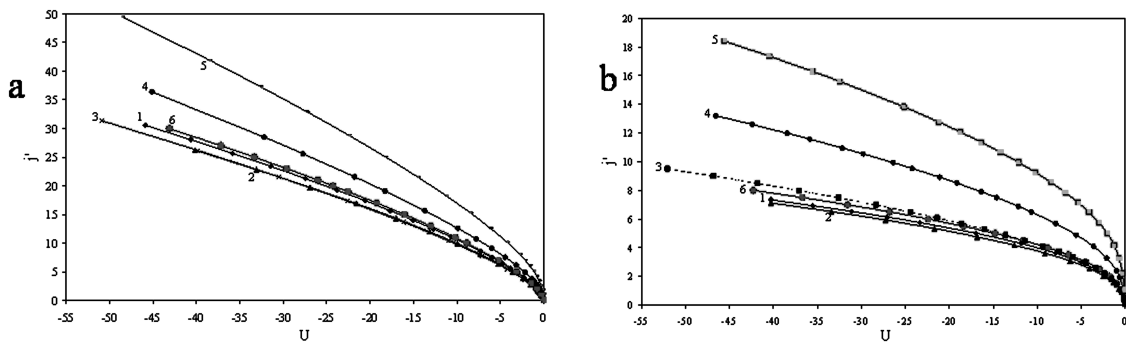


Рис. 4. Зависимости величины j' от безразмерного потенциала U для размера зонда $a = 1,0$:
 а) сфера: 1 – $A = 0,02$; 2 – $A = 0,1$; 3 – $A = 0,5$; 4 – $A = 2$; 5 – $A = 5$; 6 – радиальная теория без учета ионизации;
 б) цилиндр: 1 – $A = 0,02$; 2 – $A = 0,1$; 3 – $A = 0,5$; 4 – $A = 2$; 5 – $A = 5$; 6 – радиальная теория без учета ионизации

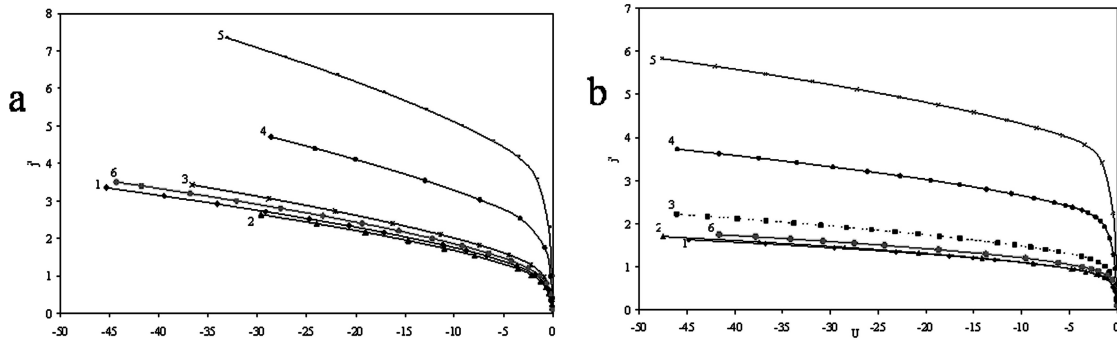


Рис. 5. Зависимости величины j' от безразмерного потенциала U для размера зонда $a = 10,0$:
 а) сфера: 1 – $A = 0,02$; 2 – $A = 0,1$; 3 – $A = 0,5$; 4 – $A = 2$; 5 – $A = 5$; 6 – радиальная теория без учета ионизации;
 б) цилиндр: 1 – $A = 0,02$; 2 – $A = 0,1$; 3 – $A = 0,5$; 4 – $A = 2$; 5 – $A = 5$; 6 – радиальная теория без учета ионизации

Для сравнения были проведены численные решения уравнений (1), (2) исходной радиальной теории без учета ионизации в расширенном диапазоне параметра $x = \frac{r}{\lambda_d}$, для чего использовались более точные аналитические начальные приближения для потенциала на больших расстояниях от зонда, учитывающие левые части уравнений (1), (2):

$$U = -\frac{c^2}{2x^2} \left(1 + \frac{c^2}{x^2} - \frac{4c^2}{x^4} + \frac{3}{2} \frac{c^4}{x^4} \right), \quad c = x_3 j'_3, \quad (11)$$

$$U = -\frac{c^2}{2x^4} \left(1 + \frac{c^2}{x^4} - \frac{12c^2}{2x^6} + \frac{3}{2} \frac{c^4}{x^8} \right), \quad c = x_3^2 j'_3. \quad (12)$$

В [8], [9], [13] использовался только первый член в суммах, что соответствует нулевым левым частям уравнений (1), (2). Следует отметить, что расширение расчетных данных для малых $\frac{r_3}{\lambda_0}$ является актуальным для диагностики сильно разреженной плазмы. Помимо этого зондовая теория применяется для описания процессов зарядки пылевых частиц в плазме и образования плазменных кристаллов, где размеры частиц в эксперименте составляют $0,0001 \div 0,05 \frac{r_3}{\lambda_0}$.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Проанализируем результаты расчетов для случая отсутствия учета ионизации в объеме (радиальная теория). Для малого сферического зонда ($a \leq 0,01$) для величины безразмерной плотности ионного тока достаточно хорошо подходит аппроксимация:

$$j' = \frac{U}{a} \quad \text{или} \quad j_3 = \frac{e \varphi_3}{r_3} \sqrt{\frac{\varepsilon_0 n_0}{M}}, \quad (13)$$

то есть ток на зонд пропорционален потенциалу зонда, корню из концентрации плазмы и радиусу зонда и не зависит от электронной температуры.

При $a \lesssim 10$ хорошо подходит аппроксимирующая формула

$$j' = \frac{4 + 0,6a}{1 + a} + \left(\frac{U}{a} \right)^{\frac{3+0,5a}{3+a}}. \quad (14)$$

Для цилиндра при $a \leq 0,01$ и $a \lesssim 10$ применимы выражения:

$$j' = \frac{0,23}{a} U^{2/3}; \quad j' = \frac{0,2 + 0,5a^{1/3}}{a} U^{2/3} + 0,6. \quad (15)$$

При $a > 0,1$ вычисления совпадают с результатами [8], [9], [13].

В случае учета объемной ионизации, как видно из рис. 2–6, с увеличением частоты ионизации A плотность ионного тока сначала несколько падает и, проходя через некоторый минимум, далее монотонно возрастает. В сферическом случае, например при любых значениях параметра a , зависимость плотности тока от частоты ионизации хорошо описывается следующим выражением:

$$\frac{j'}{j'_0} = 1 - 0,52 A^{1/3} + \left(0,34 + \frac{a}{10 + 1,2a} \right) A^{2/3}. \quad (16)$$

Здесь j'_0 – плотность ионного тока при $A = 0$.

Дифференцирование (16) позволяет получить частоту ионизации $A_{\min}$, соответствующую минимуму плотности ионного тока. При $a \ll 0,1$ получаем $A_{\min} = 0,5$, что соответствует расчетным данным. Для цилиндрического зонда можно предложить аналитическую зависимость

$$\frac{j'}{j'_0} = 1 - 0,65 A^{1/3} + \left(0,52 + \frac{a}{3 + 1,3a} \right) A^{2/3}.$$

Зависимость плотности ионного тока от частоты ионизации в объеме может быть качественно объяснена следующим образом. При малых размерах области возмущения r_0 (большая частота ионизации) рождаемые вследствие ионизации ионы находятся в сильном поле зонда и быстро уходят на него, создавая большой ионный ток. С увеличением области возмущения путь ионов увеличивается и ионный ток снижается. При больших размерах области возмущения ионный ток снова несколько увеличивается, так как снижается другой, тормозящий эффект ио-

низации – отставание дрейфовой скорости рожденных ионов от средней дрейфовой скорости потока ионов, уже ускоренных полем на больших расстояниях. При $A \rightarrow 0$ и, следовательно, $x_0 \rightarrow \infty$ результаты расчетов соответствуют результатам радиальной теории.

Наличие минимума ионного тока может объяснить образование плазменного кристалла. Так, в [3], [5], [6] обнаружены максимумы значений заряда и потенциала пылевой частицы в зависимости от межчастичного расстояния, соответствующие установившемуся межчастичному расстоянию. Это объясняется немонотонной зависимостью ионного тока из плазмы на пылевую частицу. С увеличением радиуса зонда "а" глубина минимума ионного тока уменьшается, как и $A_{\min}$. Это подтверждает нестабильность существования кристаллов с крупными пылевыми частицами.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Типичное значение параметра "А" в разрядах низкого давления в трубках с радиусом r_{cm} – $A \sim \frac{\lambda_D}{r_{cm}} \ll 1$. Однако в пылевой плазме, где потери

заряженных частиц возрастают, этот параметр может существенно увеличиться. По результатам расчетов можно сделать следующие выводы.

- Уменьшение размера зонда ниже дебаевского электронного радиуса в обычной радиальной теории приводит к росту плотности тока на зонд обратно пропорционально радиусу зонда. При этом ток на зонд пропорционален потенциалу зонда в сферическом и потенциалу в степени 2/3 в цилиндрическом случаях.

- Зависимость ионного тока на зонд от частоты ионизации при всех размерах зонда и любой геометрии немонотонная. С ростом объемной ионизации плотность тока на зонд сначала уменьшается, а затем растет. В пылевой плазме наличие минимума ионного тока на пылевую частицу может объяснять образование устойчивой пылевой структуры.

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., Фортон 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. 551 с.
3. Сусун А. В., Шелестов А. С. Моделирование процессов зарядки наночастиц в плазме и установления межчастичного расстояния // Математическое моделирование. 2008. Т. 20. № 8. С. 41–47.
4. Сусун В. И. Ионный ток на зонд при промежуточных давлениях и область возмущения плазмы зондом // Физика плазмы. 1978. Т. 4. № 4. С. 931–937.
5. Сусун В. И., Сусун А. В., Хахаев А. Д., Шелестов А. С. Зависимость потенциала и заряда пылевой частицы от межчастичного расстояния и его установление в плазме низкого давления // Физика плазмы. 2008. Т. 34. № 6. С. 548–556.
6. Сусун 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.
7. 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.
8. 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.
9. 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.
10. 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.
11. Bernstein I. B., Rabinowitz I. N. Theory of Electrostatic Probes in a Low-Density Plasma // Phys. Fluid. 1959. Vol. 2. № 2. P. 112–121.
12. Caruso A., Cavaliere A. The Structure of the Collisionless Plasma-sheath Transition // Nuovo Cimento. 1962. Vol. 26. P. 1389–1404.
13. 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.
14. Harrison E. R., Thomson W. B. The Low Pressure Plane Symmetric Discharge // Proc. Phys. Soc. 1959. Vol. 74. № 2. P. 145.
15. 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.
16. 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.
17. Nairn C. M. C., Annaratone B. M., Allen J. E. On the theory of spherical probes and dust grains // Plasma Sources Sci. Technol. 1998. V. 7. № 4. P. 478–491.
18. Tonks L., Langmuir I. A General Theory of the Plasma of an Arc // Phys. Rev. 1929. Vol. 34. № 6. P. 876–922.

НИКОЛАЙ АРКАДЬЕВИЧ ДЯТКО

кандидат физико-математических наук, ведущий научный сотрудник, Троицкий институт инновационных и термоядерных исследований (г. Троицк, Московская область)
dyatko@triniti.ru

МОДИФИКАЦИЯ ПОВЕРХНОСТИ ПОЛИМЕРНЫХ ПЛЕНОК С ПОМОЩЬЮ ГАЗОРАЗРЯДНОЙ ПЛАЗМЫ: МЕТОДЫ ХАРАКТЕРИЗАЦИИ ПОВЕРХНОСТИ И ПРОБЛЕМЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ

В работе рассмотрены некоторые методы, применяемые для характеристики поверхности обработанных в разрядной плазме полимерных пленок. Приведены характерные результаты таких исследований и отмечено, какие из измеряемых характеристик могут быть получены в расчетах. Обсуждаются проблемы моделирования, приведен пример моделирования взаимодействия воздушной плазмы атмосферного давления с поверхностью полипропиленовой пленки.

Ключевые слова: разряд, плазма, полимерные пленки, модификация, моделирование

ВВЕДЕНИЕ

Полимерные пленки и полимерные волокна в настоящее время очень широко применяются в различных отраслях промышленности, сельском хозяйстве, торговле и т. д. Хорошо известны такие полимеры, как полиэтилен (ПЭ), полипропилен (ПП) и полиэтилентерефталат (ПЭТ) (рис. 1). Например, волокнообразующий ПЭТ известен на рынке под названиями лавсан или полиэстер. Область применения конкретной полимерной пленки определяется ее свойствами, такими как проницаемость по отношению к различным газам, химическая стойкость, жиро- и маслостойкость, механическая прочность, тепло- и морозостойкость, прозрачность, блеск, эластичность, способность к сварке и др. Наряду с указанными свойствами важной характеристикой пленок и волокон является степень их смачиваемости (несмачиваемости) различными жидкостями. По отношению к воде эта характеристика известна также как гидрофильность (гидрофобность). Для хорошей смачиваемости (и адгезии) свободная поверхностная энергия полимерной пленки должна быть больше, чем поверхностное натяжение жидкости. Для хорошей гидрофобности требуется обратное соотношение: поверхностная энергия полимерной пленки должна быть значительно меньше, чем поверхностное натяжение жидкости. Поверхностная энергия большинства полимеров относительно невелика по сравнению с поверхностным натяжением воды (рис. 2). Для некоторых применений (упаковки, защитные покрытия и др.) это положительное свойство, но для ряда других (окраска, печать и др.) малая поверхностная энергия является недостатком.

© Дятко Н. А., 2011

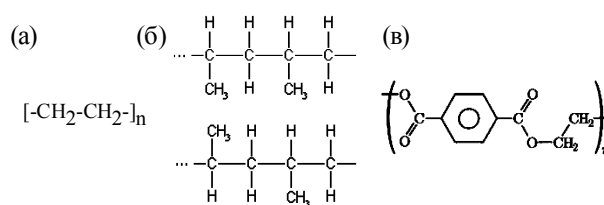


Рис. 1. Структурные формулы различных полимерных молекул: (а) – полиэтилен, (б) – полипропилен двух типов ориентации групп CH_3 в полимерной цепи, (в) – полиэтилентерефталат

Заметим, что для характеристики полимеров и жидкостей используются разные величины («свободная поверхностная энергия» и «поверхностное натяжение») с различными единицами измерения ($мДж/м^2$ и $мН/м$). Однако эти величины часто используются вместе, так как обе являются мерой силы взаимодействия между молекулами и имеют по сути одну и ту же размерность ($мДж/м^2 = мН/м \times м/м$).

Одним из способов изменения поверхностной энергии полимерных пленок является модификация их поверхности в разрядной плазме [2], [6], [7], [8], [9], [10], [15], [16], [18], [20], [21], [23], [25], [28], [32], [34], [35], [38]. Суть этой обработки состоит во внедрении в поверхностные слои полимера различных функциональных групп. Хорошо известно, что внедрение кислородосодержащих групп приводит к увеличению поверхностной энергии. Имеются в виду такие группы, как $C-OH$, $C-O-O-H$, $H-C=O$, $C=O$, $C-O-C=O$, $H-O-C=O$ и др. Внедрение фторсодержащих групп ($C-F$, $C-CF_3$ и др.) приводит к уменьшению поверхностной энергии. Поэтому для усиления гидрофильности пленок используются разряды в газовых смесях с кислородом (например, в воздухе), а для усиления гидрофоб-

ности – разряды в газовых смесях с фторсодержащими газами (например, в смесях с CF_4).

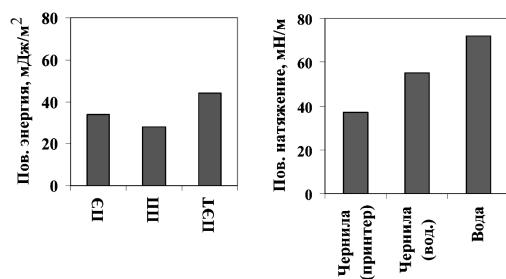


Рис. 2. Сравнительный анализ значений свободной поверхностной энергии некоторых полимерных пленок и величин поверхностного натяжения различных жидкостей (термин «вода» используется для обозначения дистиллированной воды)

В разрядной плазме образуются химически активные радикалы (например, в процессах диссоциации нейтральных молекул электронным ударом и последующих химических реакциях), которые взаимодействуют с полимерными молекулами. В разряде в воздухе, содержащем пары воды, такими активными частицами являются O , OH , O_2 , O_3 , H , NO и др. Модификация поверхности будет происходить также за счет взаимодействия полимерных молекул с ионами, возбужденными атомами и молекулами и излучением плазмы. Относительная роль различных процессов зависит от следующих условий: давление газовой смеси, тип разряда, способ организации взаимодействия плазмы с поверхностью и др. В случае плотной плазмы (например, при атмосферном давлении) модификация поверхности полимерных пленок происходит, по-видимому, в основном за счет химических реакций нейтральных активных частиц плазмы с полимерными молекулами.

Исследованию модификации свойств полимерных пленок в разрядной плазме посвящено огромное число работ, причем большинство из них являются экспериментальными. Общий принцип экспериментальных исследований состоит в том, что сравниваются некоторые характеристики пленки до и после обработки в разрядной плазме в зависимости от разрядных условий, длительности обработки в плазме и времени, прошедшего после окончания обработки. В исследованиях используются разряды различных типов (телющий, барьерный, коронный, ВЧ) при давлениях газовой смеси от долей Торр до атмосферного. Для промышленности предпочтительнее разряд при атмосферном давлении.

Что касается моделирования процессов взаимодействия плазмы с поверхностью полимерных пленок, то в настоящее время имеется всего несколько работ [3], [5], [11], [12], [36], в которых предприняты попытки создать более или менее согласованную модель такого взаимодействия. В настоящей работе обсуждаются сложности, которые возникают при создании такого рода

моделей, и приведен пример моделирования взаимодействия воздушной плазмы атмосферного давления с поверхностью полипропиленовой пленки. Расчетные результаты желательно сравнивать с экспериментальными данными, поэтому сначала коротко описываются наиболее часто используемые методы характеристики поверхности пленок и обсуждается, какие из измеренных характеристик могут быть получены в расчетах.

НЕКОТОРЫЕ МЕТОДЫ ХАРАКТЕРИЗАЦИИ ПОВЕРХНОСТИ ПОЛИМЕРНЫХ ПЛЕНОК

Измерение контактных углов

Одним из распространенных методов характеристики поверхности является метод измерения контактного угла между каплей какой-либо жидкости (например, дистиллированной воды) и поверхностью пленки (рис. 3). Чем меньше контактный угол, тем больше смачиваемость (гидрофильность) пленки. Типичное значение контактного угла капля дистиллированной воды для необработанной пленки полипропилена составляет $\approx 100^\circ$. Для полиэтилена и полиэтилентерефталата эти значения равны 90 и 70° соответственно.

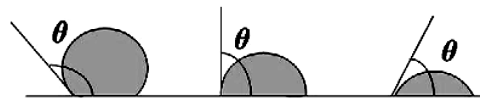


Рис. 3. Контактный угол между каплей жидкости и поверхностью полимерной пленки. Чем меньше угол, тем больше смачиваемость (гидрофильность) пленки

После обработки пленки в плазме величина контактного угла изменяется. Так, для ПП-пленки, обработанной в плазме барьерного разряда в воздухе (рис. 4), контактный угол заметно уменьшается (со 100 до 40°), то есть гидрофильные свойства пленки усиливаются.

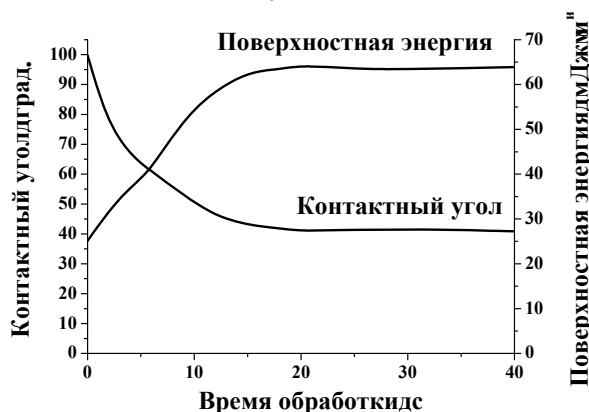


Рис. 4. Изменение контактного угла (для дистиллированной воды) и поверхностной энергии полипропиленовой пленки в зависимости от времени обработки в однородном барьерном разряде в воздухе при давлении 22 Торр: межэлектродное расстояние – 2 мм, частота – 18 кГц, мощность разряда по отношению к единице поверхности пленки – $0,65 \text{ Вт/см}^2$.

Данные взяты из работы [24]

Отметим также, что уменьшение контактного угла наблюдается при увеличении времени обработки от 0 до ~ 20 с (для условий эксперимента [24]). При дальнейшем увеличении времени обработки образца контактный угол практически не изменяется.

Измеряя контактные углы для различных жидкостей с известными характеристиками, можно рассчитать поверхностную энергию пленки. Для этого используется, например, теория, разработанная Owens, Wendt [26] и Kaelble [19]. Согласно [19], [26], для определения поверхностной энергии пленки необходимо провести измерения контактного угла по меньшей мере для двух жидкостей с различными значениями дисперсионной и полярной компонент поверхностного натяжения. В измерениях часто используются такие жидкости, как вода, формамид, диiodметан и 1-бромнафталин (их характеристики см. в [24], [41]).

Изменение поверхностной энергии ПП-пленки в зависимости от времени обработки показано на рис. 4. За время обработки поверхностная энергия пленки увеличивается более чем в два раза.

С точки зрения моделирования представляет интерес именно зависимость контактного угла (или поверхностной энергии) от времени обработки. Она позволяет определить характерное время изменения и выхода на стационарные значения указанных величин, что, по-видимому, соответствует насыщению поверхности внедренными функциональными группами.

Рентгеновская фотоэлектронная спектроскопия (РФЭС) или электронная спектроскопия для химического анализа (ЭСХА)

Этот метод основан на фотоэффекте. Образец облучается рентгеновским излучением, анализируется спектр вылетевших под определенным углом электронов (рис. 5). Для исследования полимеров используются, например, источники рентгеновского излучения на переходах атомов Mg ($h\nu = 1256,6$ эВ) и Al ($h\nu = 1486,6$ эВ).

Энергия вылетевших электронов $E_K = h\nu - E_B - W$, где $h\nu$ – энергия кванта, E_B – энергия связи электрона в атоме, W – работа выхода электронов. Поскольку энергия вылетевшего электрона зависит от используемого источника рентгеновского излучения, энергии фотона, удобнее пересчитать ее в энергию связи $E_B = h\nu - E_K - W$; именно в такой шкале строятся спектрограммы. Информативными являются электроны, которые вылетели из полимера, не испытав неупругих соударений. Обычно анализ проводится по вылетевшим 1s-электронам, но кроме пиков, обусловленных 1s-электронами, в спектре могут присутствовать пики, связанные с 2s-электронами и так называемыми оже-электронами. Энергия связи 1s-электронов в атомах C, N, O и F равна соответственно 284, 400, 532 и 686 эВ.

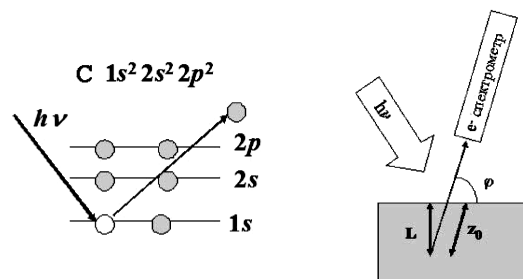


Рис. 5. Схемы, поясняющие принцип метода РФЭС на примере атома углерода (слева) и соотношение между глубиной анализа L и длиной измерения z_0 , $L = z_0 \sin \varphi$ (справа)

Типичные геометрические характеристики РФЭС-спектрометров следующие: источник рентгеновского излучения засвечивает область ~ 1 см², а площадь, с которой регистрируются вылетевшие электроны, составляет ~ 1 мм². Глубина анализа, то есть толщина слоя полимерной пленки, из которого вылетает большая часть (95 %) регистрируемых электронов, составляет не более 10 нм. Этот размер значительно меньше, чем глубина проникновения рентгеновского излучения.

Вероятность того, что, пройдя в полимере расстояние z , электрон не испытает неупругих соударений, убывает с пройденным расстоянием как $P(z) = \exp(-z/\lambda)$, где λ – длина пробега электрона по отношению к неупругим соударениям. В полимерах для вылетевших 1s-электронов (энергия которых ~ 1000 эВ) $\lambda \approx 2,5\text{--}3$ нм. Поэтому $z_0 = 3\lambda \approx 8\text{--}10$ нм – это та длина, в пределах которой и набирается $\approx 95\%$ сигнала. Глубина анализа пленки (то есть расстояние, перпендикулярное поверхности) зависит от угла наблюдения и равна $L = z_0 \sin \varphi$ (см. пояснительный рис. 5). При $\varphi = 90^\circ$ $L = z_0 \approx 8\text{--}10$ нм; при $\varphi = 30^\circ$ $L = 0,5z_0 \approx 4\text{--}5$ нм. Толщина одного слоя полимера оценивается как $\xi \approx 0,5$ нм. Поэтому при $\varphi = 90^\circ$ глубина анализа составляет $16\text{--}20$ слоев, а при $\varphi = 30^\circ$ – $8\text{--}10$ слоев.

На рис. 6 показаны РФЭС-спектры, полученные до и после обработки ПП-пленки в барьерном разряде атмосферного давления в воздухе. Как видно из рис. 6, исходный спектр имеет только C 1s-пик, а после обработки появляется пик, соответствующий O 1s-электронам. Это говорит о том, что во время обработки в поверхностные слои ПП-пленки внедрились атомы O.

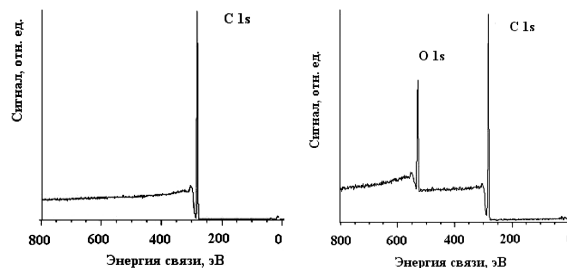


Рис. 6. Типичный РФЭС-спектр, полученный для исходной ПП-пленки (слева) и измеренный после обработки в барьерном разряде атмосферного давления в воздухе [24]

Поток S $1s$ -электронов (аналогично и для $1s$ -электронов, выбитых из других атомов), попадающих в спектрометр:

$$\begin{aligned} S_C &\sim k_f \times k_C \times \int_0^\infty C(z) \exp(-z/\lambda) dz = \\ &= \sim k_f \times k_C \times \int_0^\infty C(x) \exp(-x/(\lambda \sin \varphi)) dx = \\ &= \sim k_f \times k_C \times \sum_{i=0}^\infty C^i \exp(-i\xi/(\lambda \sin \varphi)), \end{aligned}$$

где k_f – плотность потока фотонов, k_C – вероятность фотоионизации (S $1s$ -электронов), x – координата вдоль нормали к поверхности, $x = z \sin \varphi$, i – номер слоя полимера, $C(z)$ – плотность атомов C , C^i – концентрация атомов C в i -м слое (на единицу площади). Измерив потоки S $1s$ - и O $1s$ -электронов (то есть получив РФЭС-спектр), можно рассчитать отношение концентраций O и C атомов в поверхностной области пленки, используя известные вероятности фотоионизации и предполагая, что величина λ приблизительно одинакова для выбитых S $1s$ - и O $1s$ -электронов:

$$(O/C)(\varphi) = \frac{S_O/k_O}{S_C/k_C} = \frac{\int_0^\infty O(x) \exp(-x/(\lambda \sin \varphi)) dx}{\int_0^\infty C(x) \exp(-x/(\lambda \sin \varphi)) dx} = \frac{\sum_{i=0}^\infty O^i \exp(-i\xi/(\lambda \sin \varphi))}{\sum_{i=0}^\infty C^i \exp(-i\xi/(\lambda \sin \varphi))}.$$

Полученное таким способом отношение O/C является усредненным по глубине анализа значением. По измеренной зависимости $(O/C)(\varphi)$ можно восстановить распределение концентрации атомов O по глубине приповерхностного слоя пленки (способы решения этой задачи описаны, например, в [27]). Все изложенное выше относится и к определению отношения концентраций атомов F/C для случая обработки полимерных пленок в газовых смесях, содержащих, например, CF_4 .

Характерные значения F/C ($\varphi = 90^\circ$), полученные после обработки таких полимерных пленок, как ПП, ПЭТ и др., составляют $\sim 0,8 \div 1,2$ [17]. Такие значения могут быть получены только в случае, когда атомы F (или F -содержащие радикалы) проникают в полимер на много слоев и их концентрация медленно спадает по глубине. Этот вывод подтверждается экспериментами по измерению F/C при различных углах регистрации фотоэлектронов.

Характерные значения O/C ($\varphi = 90^\circ$), полученные для ПП в различных экспериментальных условиях [3], [9], [25], составляют $\sim 0,16 \div 0,25$. Для ПЭТ (в состав которого входит кислород, так что исходное значение $O/C = 0,4$) характерная величина после обработки составляет $\sim 0,45 \div 0,50$ [2], [3], [5], [9], [11], [12], [36]. Указанные значения O/C могут достигаться, даже если кислород внедрен только в верхний слой (или несколько верхних слоев) полимерной пленки. Например, в работе [22] показано, что в

ПЭТ после обработки в разряде концентрация атомов O максимальна в верхнем слое и резко убывает с глубиной.

Как показывают эксперименты, отношение O/C растет с увеличением времени обработки и через некоторое время (которое зависит от условий эксперимента) выходит на установившееся значение.

В работе [9] измерялись O/C ($\varphi = 90^\circ$) и контактный угол (дистиллированная вода) в зависимости от величины энергии барьерного разряда в воздухе, приходящегося на единицу площади обрабатываемой ПП-пленки, то есть в зависимости от времени обработки. Показано, что характерные времена изменения (выхода на установившиеся значения) величины O/C и контактного угла практически совпадают.

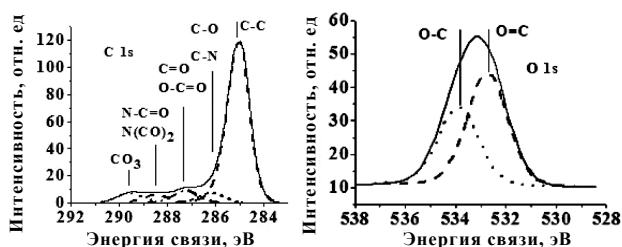
Энергия связи $1s$ -электрона в атоме зависит от того, в составе какой химической группы находится данный атом. В табл. 1 приведены энергии связи S $1s$ - и O $1s$ -электронов для атомов C и O , находящихся в составе различных групп. Как видно из табл. 1, энергия связи может меняться в пределах нескольких эВ.

Таблица 1

Энергии связи электронов

C 1s		O 1s	
Группа	E_B , эВ	Группа	E_B , эВ
C-H, C-C	285	O-C	533,8
C-N	286	O=C	532,3
C-O-H, C-O-C	286,5		
C-F	287,8		
C=O	288		

В полученных РФЭС-спектрах (см., например, рис. 6) содержится информация об атомах, входящих в состав различных функциональных групп. Раскладывая соответствующий спектр на компоненты (рис. 7), можно получить количественную информацию о соотношении различных функциональных групп. Это соотношение будет пропорционально площадям отдельных спектров.

Рис. 7. Пример разложения S $1s$ - и O $1s$ -спектров на компоненты [3]

Для такого разложения существуют специальные программы, которые содержат информацию об энергиях связи электронов в атомах в составе различных функциональных групп и позволяют для заданного набора групп подог-

нать линейную комбинацию отдельных спектров (форма которых задается) к измеренному спектру. Для лучшей подгонки варьируется не только высота отдельных спектров, но и положение их максимумов и ширины (в разумных пределах).

Таким образом, используя метод РФЭС, можно определить соотношение концентраций различных атомов и функциональных групп, внедренных в полимерную пленку в процессе обработки, а также их распределение по глубине пленки. Именно поверхностные концентрации различных функциональных групп рассчитываются при моделировании взаимодействия плазмы с полимерной пленкой. Сравнение расчетных результатов с данными РФЭС-анализа дает возможность проверять и совершенствовать модель.

Другие методы

Для характеристики поверхности полимерных пленок используются и другие методы. Например, проводятся исследования поверхности полимерной пленки с помощью атомного силового микроскопа [22], [39]. Сравнивая структуру поверхности до и после обработки, можно делать выводы о степени травления поверхности. Достаточно широко используются методы ИК-спектроскопии [39]. Анализ спектров позволяет делать выводы о том, какие функциональные группы появляются в приповерхностной области пленки после обработки в плазме.

ПРОБЛЕМЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ

Моделирование взаимодействия плазмы разряда с поверхностью полимерной пленки состоит из нескольких взаимосвязанных этапов.

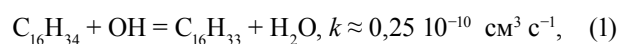
1. Моделирование разряда, то есть для заданных условий (тип разряда, геометрия разрядной камеры, газовая смесь, давление и др.) расчет разрядных характеристик и состава плазмы (пространственное распределение концентраций атомов и молекул, радикалов, возбужденных частиц, ионов и электронов). Кинетические модели плазмохимических процессов в плазме таких газов, как, например, воздух, CF_4 и других, в настоящее время достаточно хорошо развиты (см., например, [1], [14], [29]). Проблема состоит в том, что в большинстве практически интересных случаев используемые разряды сильно неоднородны (коронный разряд, филаментированный барьерный разряд и др.). Моделирование таких разрядов даже в настоящее время представляет значительные трудности. Кроме того, при обработке пленки образуются дополнительные молекулы и радикалы, которые поступают в разрядный промежуток и могут изменять условия горения разряда, что также необходимо учитывать. Для расчета состава плазмы в таких условиях обычно используются приближенные подходы.

2. Описание транспортировки активных частиц плазмы к поверхности пленки. В зависимости от условий пленка может быть расположена либо непосредственно в разрядном промежутке (например, в случае барьерного разряда она располагается на поверхности одного из электродов [9]), либо на некотором расстоянии, и плазма выдувается потоком газа в сторону пленки [3]. В последнем случае нужно корректно описывать перенос плазмы из области разряда к поверхности пленки. По известной концентрации (n) активных частиц плазмы у поверхности пленки и их температуре (или тепловой скорости, v_T) поток частиц на поверхность оценивается как $0,25nv_T$ (кинетический поток).

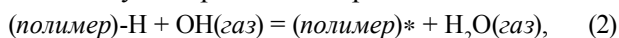
3. Моделирование взаимодействия активных частиц плазмы с поверхностью пленки. Для решения этой проблемы необходимо создание согласованных моделей взаимодействия плазмы с поверхностью, то есть наборов реакций между частицами плазмы и поверхностью и наборов возможных поверхностных реакций между внедренными в поверхность функциональными группами. Необходимо также создание моделей для описания проникновения активных частиц в более глубокие слои полимера. Кроме того, желательно, чтобы модель позволяла воспроизводить наблюдаемый эффект «старения», то есть эффект изменения во времени характеристик пленки (O/C , контактного угла) после окончания обработки в плазме (см., например, [37], [40]).

Имея набор реакций взаимодействия, необходимо оценить вероятности и константы этих реакций. Как уже отмечалось, в настоящее время имеется всего несколько работ [3], [5], [11], [12], [36], в которых предприняты попытки создать более или менее полную согласованную модель такого взаимодействия.

Многие реакции взаимодействия активных частиц плазмы с поверхностью выбираются по аналогии с реакциями в газовой фазе между соответствующими атомами и радикалами и «большими» молекулами. Например, из литературы известна реакция отрыва атома Н радикалом ОН:



поэтому можно ожидать, что при взаимодействии ОН с макромолекулой ПП на поверхности пленки будет происходить реакция



где значок * обозначает свободную валентную связь.

Для оценки вероятности такого процесса используется следующий прием [11]. Если считать, что газокинетическая константа (то есть константа соударения двух молекул в газовой фазе) равна $10^{-10} \text{ см}^3 \text{ с}^{-1}$, то константа реакции (1) $k \approx 0,25 \cdot 10^{-10} \text{ см}^3 \text{ с}^{-1}$ означает, что вероятность

того что при соударении молекул произойдет реакция, равна 0,25. Полагая, что единица вероятности взаимодействия частиц плазмы с поверхностью соответствует газокинетической константе, именно величина 0,25 может быть использована как вероятность реакции (2). Естественно, такой метод расчета вероятности реакции является только оценочным.

МОДЕЛИРОВАНИЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ВОЗДУШНОЙ ПЛАЗМЫ АТМОСФЕРНОГО ДАВЛЕНИЯ С ПОВЕРХНОСТЬЮ ПОЛИПРОПИЛЕНОВОЙ ПЛЕНКИ

Описание модели

Кинетическая модель взаимодействия воздушной плазмы с полипропиленом была предложена в работе [11] и использована затем в работе [3]. ПП является насыщенным углеводородом с углеродной цепью, содержащей водородные и метиловые (CH_3) группы. В случае идеального ПП-материала газовые частицы, достигающие поверхности, «видят» только «торчащие» наружу атомы водорода. Реакционная способность конкретного атома водорода зависит от того, как расположен атом углерода, с которым он связан. ПП-мономер содержит три типа атомов углерода в зависимости от места их расположения: первый тип С, с которым связан еще только один атом С; второй тип С, с которым связаны два атома С; третий тип С, с которым связаны три атома С (рис. 8). Реакционная способность атомов водорода, связанных с этими атомами С, соотносится как $\text{H}_3 > \text{H}_2 > \text{H}_1$.

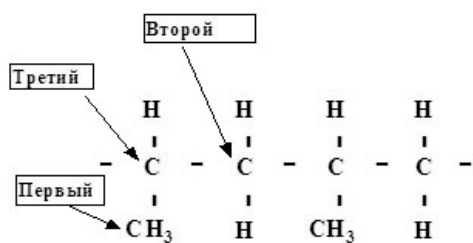


Рис. 8. Три типа С атомов в мономере полипропилена

Как уже отмечалось, в разряде в воздухе, содержащем пары воды, активными частицами являются O , OH , O_2 , O_3 , H , NO . Процессы, учитываемые в кинетической модели взаимодействия плазмы с поверхностью ПП-пленки, и используемые значения вероятностей и констант процессов представлены в табл. 2.

Процесс модификации поверхности ПП начинается с отрыва атомов H от атомов углерода атомами O и радикалами OH (№ 1–2 в табл. 2), что приводит к образованию *алкиловых* радикалов ($\sim\text{C}^*$). Далее *алкиловые* радикалы реагируют с O и O_3 , образуя *алкоксильные* радикалы ($\sim\text{C}-\text{O}^*$) (№ 3–4 в табл. 2), и с O_2 , образуя *пероксильные* радикалы ($\sim\text{C}-\text{O}-\text{O}^*$) (№ 5 в табл. 2).

Таблица 2

Процессы, включенные в кинетическую модель модификации поверхности полипропиленовой пленки в разряде атмосферного давления в воздухе [3], [11], [12]

Процессы	Вероятности, частоты (с^{-1}) и константы скоростей ($\text{см}^2/\text{с}$). Три значения соответствуют реакциям с первичными, вторичными и третичными центрами
1 $\sim\text{C}-\text{H} + \text{O} \Rightarrow \sim\text{C}^* + \text{OH}$	10^{-5} , 10^{-4} , 10^{-3}
2 $\sim\text{C}-\text{H} + \text{OH} \Rightarrow \sim\text{C}^* + \text{H}_2\text{O}$	0,0025, 0,05, 0,25
3 $\sim\text{C}^* + \text{O} \Rightarrow \sim\text{C}-\text{O}^*$	0,01, 0,01, 0,1
4 $\sim\text{C}^* + \text{O}_3 \Rightarrow \sim\text{C}-\text{O}^* + \text{O}_2$	0,5, 0,5, 1
5 $\sim\text{C}^* + \text{O}_2 \Rightarrow \sim\text{C}-\text{O}-\text{O}^*$	$5 \cdot 10^{-4}$, $2,3 \cdot 10^{-4}$, 10^{-3}
6 $\sim\text{C}^* + \text{H} \Rightarrow \sim\text{C}-\text{H}$	0,2 для всех типов
7 $\sim\text{C}^* + \text{OH} \Rightarrow \sim\text{C}-\text{O}-\text{H}$	0,2 для всех типов
8 $\sim\text{C}-\text{O}-\text{O}^* + \sim\text{C}-\text{H} \Rightarrow \sim\text{C}-\text{O}-\text{O}-\text{H} + \sim\text{C}^*$	$5,5 \cdot 10^{-16}$ ($\text{см}^2/\text{с}$) для всех типов
9 $\sim\text{C}-\text{O}^* + \sim\text{C}-\text{H} \Rightarrow \sim\text{C}-\text{O}-\text{H} + \sim\text{C}^*$	$8 \cdot 10^{-14}$ ($\text{см}^2/\text{с}$) для всех типов
10 $\sim\text{C}-\text{O}-\text{H} + \text{O} \Rightarrow \sim\text{C}-\text{O}^* + \text{OH}$	$7,5 \cdot 10^{-4}$ для всех типов
11 $\sim\text{C}-\text{O}-\text{H} + \text{OH} \Rightarrow \sim\text{C}-\text{O}^* + \text{H}_2\text{O}$	$8,2 \cdot 10^{-3}$ для всех типов
12 $\sim\text{C}-\text{O}^* \Rightarrow \sim(\text{CH}_3)\text{C}=\text{O} + \text{K}^*$	500 (с^{-1})
13 $\sim\text{C}-\text{O}^* \Rightarrow \sim\text{HC}=\text{O} + \text{A}^*$	10 (с^{-1})
14 $\sim\text{HC}=\text{O} + \text{O} \Rightarrow \sim\text{C}^*=\text{O} + \text{OH}$	0,04
15 $\sim\text{HC}=\text{O} + \text{OH} \Rightarrow \sim\text{C}^*=\text{O} + \text{H}_2\text{O}$	0,4
16 $\sim\text{C}^*=\text{O} + \text{O} \Rightarrow \text{A}^* + \text{CO}_2$	0,4
17 $\sim\text{C}^*=\text{O} + \text{OH} \Rightarrow \sim(\text{OH})\text{C}=\text{O}$	0,12
18 $\sim\text{C}-\text{O}-\text{O}^* + \text{NO} \Rightarrow \sim\text{C}-\text{O}^* + \text{NO}_2$	0,02 для всех типов

Алкиловые радикалы также могут реагировать с атомами H (№ 6 в табл. 2), что приводит к восстановлению ПП-мономера. Заметим, что вероятность этих процессов достаточно велика. Также *алкиловые* радикалы реагируют с OH , что приводит к образованию *алкогольных* групп ($\sim\text{C}-\text{O}-\text{H}$) (№ 7 в табл. 2).

Пероксильные радикалы отрывают атомы водорода от других полимерных цепей или с соседних реакционных центров той же самой цепи. При этом образуются *гидропероксиды* ($\sim\text{C}-\text{O}-\text{O}-\text{H}$) (№ 8 в табл. 2). В свою очередь, разрушение *гидропероксидов* ведет к образованию различных оксидных групп, но этот процесс медленный по сравнению с образованием *алкоксильных* и *пероксильных* радикалов. Время разрушения составляет около 30 часов [30]. По этой причине процесс разрушения гидропероксидов не рассматривается в данной модели. Аналогичные процессы имеют место и для *алкоксильных* радикалов, при этом образуются *алкогольные* группы (№ 9 в табл. 2). Последующие реакции *алкогольных* групп с O и OH радикалами приводят к образованию *алкоксильных* радикалов (№ 10–11 в табл. 2).

Алкоксильные радикалы являются основным источником образования разрывов в мономере-

ной цепи. Так называемые β -разрывы на углеродных атомах *третьего* типа приводят к образованию *кетонов* ($\sim(\text{CH}_3)\text{C}=\text{O}$), а разрывы на углеродных атомах *второго* типа приводят к образованию *альдегидов* ($\sim\text{HC}=\text{O}$) (см. рис. 9 и № 12–13 в табл. 2). Наряду с кетонами и альдегидами β -разрывы приводят к образованию «торцевых» *алкиловых* радикалов (обозначенных как K^* и A^* в табл. 2). В настоящей модели нет процессов с участием этих радикалов.

В модель не включены процессы распада кетонов. Что касается альдегидов, то в модель включены процессы образования карбонильных ($\sim\text{C}^*=\text{O}$) радикалов из альдегидов (путем отрыва атомов H радикалами O и OH, см. рис. 10 и № 14–15 в табл. 2). Эти карбонильные радикалы реагируют с атомами O с образованием CO_2 и «торцевых» алкиловых радикалов, то есть в модель включены процессы травления поверхности (см. рис. 10 и № 16 в табл. 2).

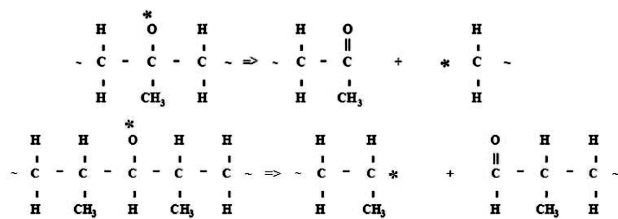


Рис. 9. Образование кетонов и альдегидов в реакциях разрыва цепи третичными и вторичными алкоксильными радикалами

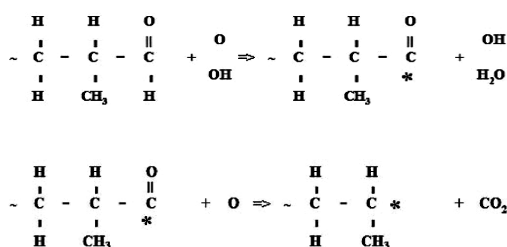


Рис. 10. Образование карбонильных радикалов и реакция травления полимерной цепи

Реакции OH с карбонильными радикалами приводят к образованию кислот ($\sim(\text{OH})\text{C}=\text{O}$) (№ 17 в табл. 2). В модель также включена реакция пероксильных радикалов с молекулами NO (№ 18 в табл. 2), которая приводит к образованию алкоксильных радикалов. Эта реакция была предложена в работе [12].

Моделирование

В работе [3] данная модель применялась для описания модификации ПП-пленки в самоподдерживающемся диффузионно-нитевидном разряде постоянного тока в потоке атмосферного воздуха. Поток воздуха был направлен перпендикулярно электрическому току, а его скорость была равна ~ 20 м/с. Средняя частота возникновения токовых нитей составляла несколько ки-

логгерц, а средняя мощность разряда — ~ 35 Вт. Обрабатываемая пленка располагалась перпендикулярно потоку на расстоянии 2 мм от выходного отверстия. Время обработки пленки варьировалось путем изменения скорости ее перемотки с одной бобины на другую.

Зависимость контактного угла (по дистиллированной воде) от времени обработки показана на рис. 11, из которого следует, что характерное время обработки (время резкого уменьшения угла смачивания) составляет $\sim 0,5$ –1 с. Соответственно, можно ожидать, что характерное время изменения величины O/C будет таким же. РФЭС-анализ (для угла $\varphi = 90^\circ$) был выполнен только для ПП-пленки, обработанной в течение 3 с; при этом измеренное значение O/C составило $\approx 0,25$. Кроме того, анализ O 1s спектра показал, что соотношение между O-C и O=C группами составляет 40 и 60 % соответственно.

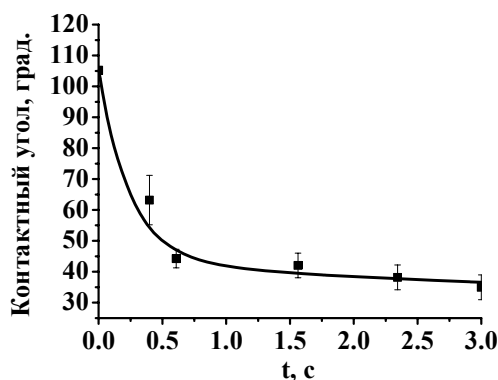


Рис. 11. Зависимость контактного угла (по дистиллированной воде) от времени обработки ПП-пленки в разряде в потоке воздуха [3]

Произведенные в плазме активные частицы переносятся потоком воздуха из зоны разряда к поверхности пленки. Концентрация этих частиц у поверхности зависит от начальных концентраций в зоне разряда и времени транспортировки, так как во время переноса происходит рекомбинация наработанных радикалов. В работе [3] начальная концентрация активных частиц в зоне разряда рассчитывалась по кинетической модели [1]. Транспорт наработанных частиц к поверхности полимера оценивался из экспериментальных данных по скорости потока (с учетом происходящих за время пролета реакций).

Согласно [3], концентрация активных частиц у поверхности пленки составляет $[\text{O}] = 8 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-3}$, $[\text{O}_2] = 5 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$, $[\text{O}_3] = 1,8 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-3}$, $[\text{OH}] = 1,8 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-3}$, $[\text{H}] = 4 \cdot 10^8 \text{ см}^{-3}$, $[\text{NO}] = 1,2 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-3}$. Газовая температура считалась комнатной. Поток активных частиц на поверхность считался равным кинетическому потоку и постоянным во времени. Начальная концентрация всех функциональных групп (за исключением атомов H в полимерной цепи) на поверхности ПП-пленки считалась равной нулю. Начальная (до начала

обработки) поверхностная концентрация Н атомов (атомов, «торчащих» из поверхности пленки) оценивалась по известной плотности ПП-пленки ($\approx 0,91 \text{ г/см}^3$) в предположении, что толщина полимерного слоя равна 0,5 нм. Ее величина составила $[\text{ПП-Н}]^0 = N^0 = 2 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-2}$. Относительные поверхностные концентрации атомов Н, присоединенных к С-атомам различных типов, были взяты в пропорции [первичный] / [вторичный] / [третичный] = 0,25/0,5/0,25, как это предложено в [11]. В расчетах учитывался только один (верхний) слой полимера, то есть проникновение активных частиц в более глубокие слои не учитывалось.

Эволюция поверхностных концентраций различных функциональных групп (включая ПП-Н-атомы) в процессе обработки рассчитывалась путем численного решения системы балансных уравнений:

$$\frac{dN_i}{dt} = Q_{\text{prod}}^i - Q_{\text{loss}}^i, \quad i = 1, 2, 3 \dots M, \quad (3)$$

где $N_i [\text{см}^{-2}]$ – поверхностная концентрация i -й функциональной группы, а M – число учитываемых в модели функциональных групп. Члены в правой части уравнения (3) описывают суммарные скорости образования и гибели i -й функциональной группы. Описанная выше кинетическая модель включает реакции трех различных типов: реакции между частицами плазмы и фун-

кциональными группами на поверхности, реакции между различными группами на поверхности и реакции разрыва цепи при взаимодействии поверхностных групп с полимерной цепью. Вид соответствующих выражений для скоростей образования и гибели частиц в правой части уравнения (3) зависит от типа реакции. Явный вид этих выражений приведен в работе [3].

На рис. 12 показаны результаты расчета поверхностных концентраций различных групп и радикалов в зависимости от времени обработки [3]. Как видно из рисунка, на временах ~ 3 с почти все атомы Н удалены с третичных и вторичных центров (в основном в реакциях с ОН-радикалами). На временах $\sim 0,5$ с резко возрастает концентрация пероксильных радикалов. Это связано с тем, что в рассматриваемых условиях концентрация молекул O_2 у поверхности полимера существенно выше, чем концентрация атомов О и молекул O_3 . Поэтому скорость образования пероксильных радикалов существенно выше, чем скорость образования алкоксильных радикалов. Концентрация пероксильных радикалов достигает максимума при $t \approx 0,5$ с и начинает уменьшаться, что обусловлено реакцией этих радикалов с молекулами NO. Эта реакция преобразует пероксильные радикалы в алкоксильные. В свою очередь, алкоксильные радикалы формируют алкогольные группы и производят разрывы в полимерной цепи (с образованием

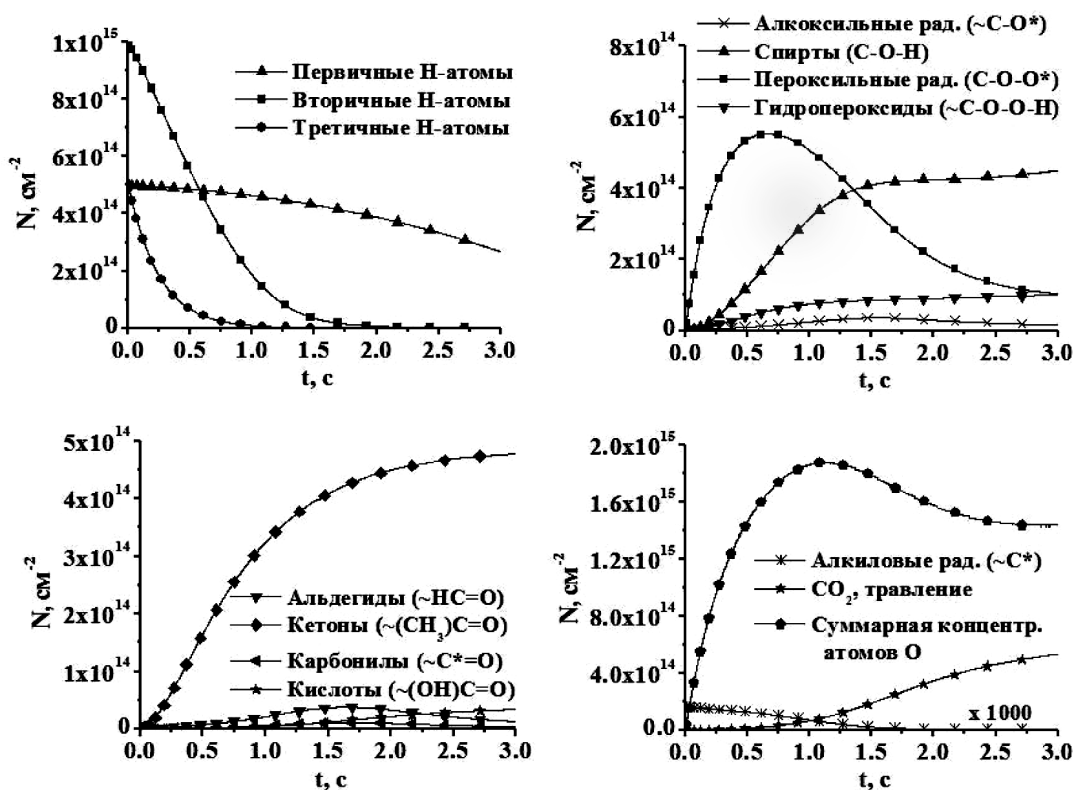


Рис. 12. Поверхностные концентрации различных групп и радикалов, рассчитанные в зависимости от времени обработки ПП-пленки [3]

альдегидов и кетонов). В результате при $t \approx 3$ с основными кислородосодержащими группами являются *алкогольные* группы и *кетоны*.

Полученные расчетные результаты можно сравнить с экспериментальными данными. Во-первых, полная концентрация атомов, внедренных в поверхностный слой, выходит на насыщение на временах ~ 1 с. Это время вполне согласуется с характерным временем по измерению контактного угла (рис. 11). Во-вторых, можно оценить величину O/C , которая была бы получена при РФЭС-анализе модельной пленки, обработанной в течение 3 с. Так как в модели все атомы O внедрены только в один (верхний) слой, измеренное значение O/C ($\varphi = 90^\circ$) будет равно

$$(O/C) = \frac{O'}{\sum_{i=0}^{\infty} C^i \exp(-i\xi/\lambda)} \approx 0,15,$$

где $O' \approx 1,5 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-2}$ (см. рис. 12), $C^i \approx 2 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-2}$, $\xi = 0,5 \text{ нм}$, $\lambda = 2,5 \text{ нм}$ (см. приведенные выше комментарии). Полученное значение $O/C \approx 0,15$ не очень сильно отличается от измеренного (0,25), учитывая, что в расчетах атомы O внедряются только в верхний слой полимерной пленки.

Как следует из расчетов, в рассматриваемых условиях основной функциональной группой, содержащей связи $O=C$, являются *кетоны*, а связи $O-C$ – *алкогольная* (спиртовая) группа. Концентрации этих групп приблизительно одинаковы, что вполне согласуется с экспериментальными данными, полученными по $O 1s$ спектру.

Как уже отмечалось, кинетическая модель содержит процессы, приводящие к разрыву полимерных цепей и к травлению атомов C . Согласно расчетам [3], количество атомов C , стравленных с единицы поверхности (см. кривую для молекул CO_2 на рис. 12) после 3 с обработки в разряде, составляет около $5,3 \cdot 10^{14}$, то есть около 27 % верхнего слоя. Кроме того, разрывы цепи ведут к образованию большого числа коротких кусков полимерной цепи. С практической точки зрения такая ситуация нежелательна, так как кусочки цепи могут быть легко удалены механическим путем. Время обработки должно быть подобрано таким образом, чтобы обеспечить достаточную степень внедрения кислорода, но не вызвать заметного разрушения полимерного слоя. Согласно расчетам, в условиях работы [3] это время должно составлять ~ 1 с.

Очевидно, что представленная модель [3], [11], [12] далека от совершенства. Дальнейшее развитие модели должно состоять в уточнении значений вероятностей и констант различных процессов и включении в модель процессов взаимодействия активных частиц с «торцевыми» радикалами, которые образуются в результате разрывов полимерной цепи. Необходимо также расширять набор возможных процессов взаимодействия плазменных частиц с поверхностью (например, в [31] приводятся реакции молекулы NO_2 , которая также образуется в воздушной плазме, с различными функциональными группами на поверхности полимера) и реакций между поверхностными функциональными группами (как внутри одной полимерной цепи, так и между соседними макромолекулами, см. [31]). В определенных условиях важную роль могут играть процессы с участием ионов, возбужденных атомов и молекул [4], квантов УФ-излучения. К сожалению, в настоящее время имеется относительно мало информации о таких процессах и их вероятностях. Еще один важный момент состоит в том, что более совершенная модель должна описывать не только взаимодействие плазмы с верхним слоем полимера, но и проникновение активных частиц плазмы в более глубокие слои полимерной пленки.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе коротко рассмотрены основные методы, используемые для характеристики обработанных в разрядной плазме полимерных пленок, и приведены типичные результаты таких исследований. Основное внимание уделено методам, позволяющим получать такие характеристики пленок, которые можно воспроизвести в расчетах. Показано, что в этом отношении наиболее важным методом является рентгеновская фотоэлектронная спектроскопия. Проанализированы сложности, которые возникают при моделировании взаимодействия плазмы с поверхностью полимера, и описана модель взаимодействия плазмы разряда атмосферного давления в воздухе с поверхностью полипропиленовой пленки. Показано, что, несмотря на несовершенство представленной модели, она позволяет получать вполне адекватные физические результаты. Коротко сформулированы пути дальнейшего совершенствования теоретической модели.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Акишев Ю. С., Дерюгин А. А., Каральник В. Б., Кочетов И. В., Напартович А. П., Трушкин Н. И. Экспериментальное исследование и численное моделирование тлеющего разряда постоянного тока атмосферного давления // Физика плазмы. 1994. Т. 20.
2. Титов В. А., Шикова Т. Г., Рыбкин В. В., Иванов А. Н. Кинетические закономерности образования газообразных продуктов на стадии инициирования окислительной деструкции полиэтилена в плазме кислорода // Химия высоких энергий. 2003. Т. 37.
3. Akishev Yu., Grushin M., Dyatko N., Kochetov I., Napartovich A., Trushkin N., Tran Minh Duc, Descours S. Studies on cold plasma-polymer surface interaction by example of PP- and PET-films // J. Phys. D: Appl. Phys. 2008. Vol. 41.
4. Amanatides E., Mataras D. Advanced Plasma Technology / Ed. by R. d'Agostino et al. Wiley-VCH, 2008.

5. Bhoj A. N., Kushner M. J. Continuous processing of polymers in repetitively pulsed atmospheric pressure discharges with moving surfaces and gas flow // *J. Phys. D: Appl. Phys.* 2007. Vol. 40.
6. Borcia G., Anderson C. A., Brown N. M. D. The surface oxidation of selected polymers using an atmospheric pressure air dielectric barrier discharge. Part II // *Appl. Surf. Sci.* 2004. Vol. 225.
7. Cui N., Brown N. M. D. Modification of the surface properties of a polypropylene (PP) film using an air dielectric barrier discharge plasma // *Appl. Surf. Sci.* 2002. Vol. 189.
8. De Geyter N., Morent R., Leys C. Surface modification of a polyester non-woven with a dielectric barrier discharge in air at medium pressure // *Surf. Coat. Technol.* 2006. Vol. 201.
9. De Geyter N., Morent R., Leys C., Gengembre L., Payen E. Treatment of polymer films with a dielectric barrier discharge in air, helium and argon at medium pressure // *Surf. Coat. Technol.* 2007. Vol. 201.
10. Decker W., Yializis A. Surface functionalization of polymer films and webs using subatmospheric plasma // 41st Ann. Technical Conf. Proc., Boston, MA, USA, 18–23 April 1998. N. Y.: Society of Vacuum Coaters, Knovel Corp, 1998.
11. Dorai R., Kushner M. J. A model for plasma modification of polypropylene using atmospheric pressure discharges // *J. Phys. D: Appl. Phys.* 2003. Vol. 36.
12. Dorai R., Kushner M. J. Plasma surface modification of polymers // 29th Int. Conf. on Plasma Science, Banff, Alberta, Canada, 2002 [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://uigelz.eecs.umich.edu/presentations.html>
13. Fang Z., Xie X., Li. Yang H., Qiu Y., Kuffel E. Comparison of surface modification of polypropylene film by filamentary DBD at atmospheric pressure and homogeneous DBD at medium pressure in air // *J. Phys. D: Appl. Phys.* 2009. Vol. 42.
14. Gabriel O., Stepanov S., Meichsner J. Transient and stable species kinetics in pulsed cc-rf CF_4/H_2 plasmas and their relation to surface processes // *J. Phys. D: Appl. Phys.* 2007. Vol. 40.
15. Guimond S., Radu I., Czeremuszkin G., Carlsson D. J., Wertheimer M. R. Polypropylene surface modification in atmospheric pressure dielectric barrier discharges (DBD) // 15th Int. Symp. on Plasma Chemistry (15th ISPC), GREMI, CNRS / University of Orleans, 9–13 July 2001. 2001. Vol. II. P. 593 (Symp. Proc.).
16. Guimond S., Wertheimer M. R. Surface degradation and hydrophobic recovery of polyolefins treated by air corona and nitrogen atmospheric pressure glow discharge // *J. Appl. Polym. Sci.* 2004. Vol. 94.
17. Hopkins J., Badyal J. P. S. Nonequilibrium glow discharge fluorination of polymer surfaces // *J. Phys. Chem.* 1995. Vol. 99.
18. Hopkins J., Wheale S. H., Badyal J. P. S. Synergistic oxidation at the plasma/polymer interface // *J. Phys. Chem.* 1996. Vol. 100.
19. Kaelble D. H. Dispersion-polar surface tension properties of organic solids // *J. Adhesion.* 1970. Vol. 2.
20. Kaminska A., Kaczmarek H., Kovalonek J. The influence of side groups and polarity of polymers on the kind and effectiveness of their surface modification by air plasma // *Eur. Polym. J.* 2002. Vol. 38.
21. Kwon O., Tang S., Myung S., Lu N., Choi H. Surface characteristics of polypropylene film treated by an atmospheric pressure plasma // *Surf. Coat. Technol.* 2005. Vol. 192.
22. L'opez-Santos C., Yubero F., Cotrino J., Barranco A., González-Elipe A. R. Plasmas and atom beam activation of the surface of polymers // *J. Phys. D: Appl. Phys.* 2008. Vol. 41.
23. Massines F., Gouda G. A comparison of polypropylene-surface treatment by filamentary, homogeneous and glow discharges in helium at atmospheric pressure // *J. Phys. D: Appl. Phys.* 1998. Vol. 31.
24. O'Hare L.-A. Surface Characterisation of Atmospheric Pressure Plasma-Modified and Coated Polymers: Ph. D. Thesis BSc (Hons), Dow Corning Ltd & Open University, 2005.
25. O'Hare L., Leadley S., Parbhoo B. Surface physicochemistry of corona-discharge-treated polypropylene film // *Surf. Interface Anal.* 2002. Vol. 33.
26. Owens D. K., Wendt R. C. Estimation of the surface free energy of polymers // *J. Appl. Polym. Sci.* 1969. Vol. 13.
27. Paynter R. W. An ARXPS primer // *Journal of Electron Spectroscopy and Related Phenomena.* 2009. Vol. 169.
28. Plasma Processing of Polymers / Ed. by R. d'Agostino, P. Favia and F. Fracassi. NATO ASI Series. 1996. Series E: Applied Sciences. Vol. 346.
29. Plumb I. C., Ryan K. R. A model of the chemical processes occurring in CF_4/O_2 discharges used in plasma etching // *Plasma Chem. Plasma Proc.* 1986. Vol. 6.
30. Poncin-Epaillard F., Brosse J. C., Falher T. Reactivity of surface groups formed onto a plasma treated poly(propylene) film // *Macromol. Chem. Phys.* 1999. Vol. 200.
31. Rabek J. F. Polymer Photodegradation: Mechanisms and Experimental Methods. 1st edn. London: Chapman and Hall, 1995.
32. Riccardi R., Barni R., Selli E., Mazzone G., Massafra M. R., Marcandalli B., Poletti G. Surface modification of poly (ethylene terephthalate) fibers induced by radio frequency air plasma treatment // *Appl. Surf. Sci.* 2003. Vol. 211.
33. Shenton M. J., Lovell-Hoare M. C., Stevens G. C. Adhesion enhancement of polymer surfaces by atmospheric plasma treatment // *J. Phys. D: Appl. Phys.* 2001. Vol. 34.
34. Sira M., Truncel D., Stahel P., Bursikova V., Navratil Z. Surface modification of polycarbonate in homogeneous atmospheric pressure discharge // *J. Phys. D: Appl. Phys.* 2008. Vol. 41.
35. Sira M., Truncel D., Stahel P., Bursikova V., Navratil Z., Bursik J. Surface modification of polyethylene and polypropylene in atmospheric pressure glow discharge // *J. Phys. D: Appl. Phys.* 2005. Vol. 38.
36. Straud C., Branch M. C. Modeling of the surface oxidation of flame-treated polypropylene film // *Combust. Sci. Technol.* 2007. Vol. 179.
37. Strobel J. M., Strobel M., Lyons C. S., Dunatov C., Perron S. J. Aging of air-corona-treated polypropylene film // *J. Adhesion Sci. Technol.* 1991. Vol. 5.
38. Strobel M., Jones V., Lyons C. S., Ulsh M., Kushner M. J., Dorai R., Branch M. C. A Comparison of corona-treated and flame-treated polypropylene films // *Plasmas Polym.* 2003. Vol. 8.
39. Svorcik V., Kolarova K., Slepicka P., Mackova A., Novotna M., Hnatowicz V. Modification of surface properties of high and low density polyethylene by Ar plasma discharge // *Polymer Degradation and Stability.* 2006. Vol. 91.
40. Vesel A., Mozetic M., Zalar A. XPS study of oxygen plasma activated PET // *Vacuum.* 2007. Vol. 82.
41. Wu S. Polymer Interface and Adhesion. Marcel Dekker Inc., N. Y.; Basel, 1982.



17 июня 2011 года исполнилось 50 лет доктору медицинских наук, профессору, заведующему кафедрой семейной медицины медицинского факультета Петрозаводского государственного университета, заместителю главного редактора нашего журнала *Наталье Владимировне Доршаковой*.

НАТАЛЬЯ ВЛАДИМИРОВНА ДОРШАКОВА К 50-летию со дня рождения

Наталья Владимировна родилась в г. Петрозаводске. В 1984 году окончила Петрозаводский государственный университет. В 1990 году защитила кандидатскую диссертацию, в 1998 году – докторскую во Всероссийском государственном научном центре пульмонологии. В 2002 году на медицинском факультете ПетрГУ она создает кафедру семейной медицины и становится ее заведующим. Активная научно-исследовательская деятельность Натальи Владимировны нашла свое применение в организации научной работы не только кафедры, но и университета: с 2001 по 2011 год она являлась проректором по научно-исследовательской работе ПетрГУ. Подготовка научных кадров, создание Центра коллективного пользования научным оборудованием ПетрГУ, открытие докторских советов, возрождение журнала «Ученые записки ПетрГУ» стали важнейшими направлениями ее деятельности, успешно воплотившимися в жизнь. Она один из основателей и руководителей научно-педагогической школы «Медицинская экология. Особенности течения заболеваний на Европейском Севере». Под ее руководством защищено 5 кандидатских диссертаций и 1 докторская. Н. В. Доршакова – автор более 150 научных работ. Исследовательская работа неоднократно поддерживалась грантами ведущих российских и зарубежных фондов и программ. В 2003–2006 годах – председатель Диссертационного совета по защите кандидатских диссертаций медицинского факультета ПетрГУ, а с 2007 года – председатель впервые открытого на факультете Диссертационного совета по защите докторских и кандидатских диссертаций. Н. В. Доршакова является членом Коллегии Министерства здравоохранения и социального развития РК, Европейского и Российского респираторных обществ, Всероссийской ассоциации врачей общей практики. Она является членом Межведомственного северо-западного координационного Совета РАН по фундаментальным и прикладным исследованиям, научным консультантом и руководителем рабочей группы ГД РФ по подготовке Закона РФ «О социально-экономическом развитии северных территорий». Наталья Владимировна – заместитель главного редактора журнала «Ученые записки ПетрГУ», входит в редколлегию журнала «Экология человека». Она лауреат премии фонда Эдберга (Швеция) за 1997 год в области экологической медицины, сертифицированный эксперт ВОЗ по проблеме «Окружающая среда и здоровье», заслуженный деятель науки РК.

Поздравляем Наталью Владимировну с юбилеем и желаем ей научных достижений, талантливых и трудолюбивых учеников и всегда быть открытой новому!



22 апреля 2011 года исполнилось 70 лет доктору геолого-минералогических наук, директору Института геологии, заведующему лабораторией геологии, технологии и экономики минерального сырья Института геологии Карельского научного центра РАН, члену редакционной коллегии нашего журнала *Владимиру Владимировичу Шипцову*.

ВЛАДИМИР ВЛАДИМИРОВИЧ ШИПЦОВ К 70-летию со дня рождения

В. В. Шипцов родился в 1941 году в г. Риге. Окончил геолого-разведочный факультет Ленинградского горного института по специальности «разведка месторождений полезных ископаемых». В 1977 году защитил кандидатскую диссертацию, в 2000 году – докторскую. С 1966 года работает в Институте геологии Карельского филиала АН СССР, с 2002 года по настоящее время – его директор.

Владимир Владимирович – высококвалифицированный специалист в области геологии неметаллических полезных ископаемых и их технологической оценки; он руководит научными исследованиями в рамках проектов по оценке нетрадиционных и новых промышленных минералов РК. В. В. Шипцов совмещает научную и научно-организационную работу с преподавательской деятельностью, являясь заведующим кафедрой геологии и геофизики горно-геологического факультета ПетрГУ. Он автор методических пособий по геологической практике для студентов по специальности «геология», руководитель аспирантской подготовки, дипломных и курсовых проектов, член президиума УМС классических университетов по геологии. Под его руководством в 2002 году защищена кандидатская диссертация. В. В. Шипцов – автор более 240 научных работ, в том числе 10 монографий (в соавторстве). Он соавтор нескольких изобретений и патентов. Создатель и руководитель научной школы по технологической минералогии индустриальных минералов, В. В. Шипцов является председателем комиссии по технологической минералогии Российского минералогического общества, членом научного совета РАН по проблемам обогащения, научного совета Российской ассоциации «Промышленные минералы», членом Президиума КарНЦ РАН.

За плодотворную деятельность В. В. Шипцов награжден почетными грамотами РАН, Минэкономразвития РК, Министерства природных ресурсов РК, в 2007 году – почетной медалью № 3 и дипломом Российской ассоциации «Промышленные минералы» за выдающийся вклад в развитие науки и практики в области отечественных промышленных минералов. В 2010 году награжден почетным золотым знаком «Ученый года-2010» лауреату «100 лучших организаций России. Наука. Инновации. Научные разработки». В. В. Шипцов является заслуженным деятелем науки РК (2001) и заслуженным деятелем науки РФ (2008).

Поздравляем Владимира Владимировича с юбилеем, желаем здоровья, счастья, успешной научной и педагогической деятельности.

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 1 печатный лист, кратких сообщений – до 5 страниц, 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

Korovushkin A. A., Pominchuk Yu. A.

USE OF VARIOUS ACTIVE SILT BIOCENOSIS FORMATION METHODS IN TREATMENT FACILITIES OF LARGE PIG-BREEDING COMPLEXES

Summary: Formation of optimum conditions for the active silt biocenosis development in treatment facilities of large pig-breeding complexes requires particular attention to the use of *Rotaria rotatoria* and *Philodina roseola*. They carry out full oxidation of polluting substances in stagnant silt weights, which provides efficiency to the industrial process of aerobic biological clearing and prevents filamentous and gel inflation of the active silt.

Key words: Biocenosis, pneumatic aeration, active silt, aerobic biological clearing, sewage, filamentous and gel inflation 7

Liabzina S. N.

ARTHROPOD COMMUNITY OF NECROBIONTS IN SOUTHERN KARELIA

Summary: Studies of different exposed carcasses were conducted in southern Karelia during 2000–2009. A total of 134 arthropod species belonging to 37 families was recorded. Three ecological groups, each characterized by a specific type of carrion association, varying in food specialization and species' biology were distinguished.

Key words: Arthropods, necrobionts, necrophagy, carrion, decomposition, Karelia 10

Melekhin A. V.

ADDITION TO BIOTA OF LICHENS OF MURMANSK REGION

Summary: Six lichen species new for Murmansk Region (*Buellia vilis*, *Caloplaca concilians*, *Dimelaena oreina*, *Lichenothelia scopularia*, *Microcalicium ahlneri*, *Pilophorus dovrensis*) are listed.

Key words: Lichens, new species, Murmansk Region 19

Sergienko L. A., Rokhlova E. L.

STRUCTURAL CHANGES IN WHITE SEA COASTAL VEGETATION COMMUNITIES

Summary: Research data on the influence of drainage on the structure of the salt marsh communities of the White Sea coast are given. It is shown that species tolerant to salification dominate in communities with unsatisfactory drainage, and euhalophytes dominate in communities with weak drainage.

Key words: Coastal zone, halophyte, drainage, tolerance 21

Tyrkin I. A., Schurov I. L., Shirokov V. A., Ivanter D. E., Shustov Ju. A.

LOSOSINKA RIVER – PROSPECTS OF SALMON RIVER STATUS REVIVAL

Summary: The problem of restoration of the salmon population in Lososinka river is analysed. Data on population density in spawning-nursery areas are presented. Results on the release of the young salmon into the river are summarized. Feeding resources and nutrition intensity of the young salmon are estimated. Data on the density of the young salmon population are presented.

Key words: Landlocked salmon, restoration of salmon population, feeding and density of young salmon 26

Churova M. V., Mescheryakova O. V., Nemova N. N.

CORRELATION FOR ACTIVITY OF ENERGY EXCHANGE ENZYMES AND FISH GROWTH RATE

Summary: The problem of influence of aerobic and anaerobic metabolism on fish growth and fish development in early ontogenesis is discussed. The correlation data on the activity of metabolic enzymes, such as cytochrome oxidase, citrate synthase, malate dehydrogenase, lactate dehydrogenase, pyruvate kinase, in muscle with fish growth rate and fish size are summarized. Regulation of enzymes' activity on transcriptional level with regard to different sizes of the fish is studied.

Key words: Aerobic and anaerobic metabolism, enzymes, fish, growth rate, body size, gene expression 31

MEDICAL SCIENCE

Karapetyan T. A., Dorshakova N. V., Nikitina K. A.

MODERN PREVENTION MEASURES AGAINST *STREPTOCOCCUS PNEUMONIA* CAUSED DISEASES IN POPULATION OF DIFFERENT AGE GROUPS

Summary: The article provides a wide range of the diseases caused by *S. pneumonia* and discusses possibilities of vaccine based preventive measures against disease development in adults and children.

Key words: Pneumococcal infections, vaccine, population 38

Lotosh T. A., Yunash V. D., Vinogradova I. A.

INFLUENCE OF CONTINUOUS LIGHTING REGIME ON BIOMARKERS OF AGEING AND LIFE SPAN OF MALE RATS

Summary: The influence of continuous lighting on biomarkers of ageing and life span of lab rats was studied. It was revealed that maintenance of rats in the regime of continuous lighting starting from the age of one month results in accelerated ageing of the organism and rapid development of age pathology. On the contrary, maintenance of rats in the continuous lighting regime starting from the age of fourteen months prolongs average and maximum life span.

Key words: Lighting regime, aging, life span, rats 43

Pashkova I. G.

COMPARATIVE ANALYSIS OF ANTHROPOMETRICAL CHARACTERISTICS AND BODY COMPOSITION OF YOUNG PEOPLE IN KARELIAN REPUBLIC

Summary: The anthropometry and body composition analysis of 508 healthy young people – students of Petrozavodsk State University was performed. The obtained results demonstrated an increase in the number of the overweight young people. The overweight developed due to the increased mass of the fat component, which is an indication of adaptation to the living conditions of the northern region. These obtained results will constitute the basis for the regional database of Karelia.

Key words: Physical development, juvenility, anthropometry, fatty, bone, muscular weight 49

Topchieva L. V., Rendakov N. L., Kolomeichuk S. N., Gurov E. V., Korneva V. A., Malysheva I. E.

ROLE OF APOLIPOPROTEIN E POLIMORPHISM IN CARDIOVASCULAR DISEASE DEVELOPMENT IN KARELIAN POPULATION

Summary: Allele frequency distribution of *apoE* gene in patients with cardiovascular diseases (CVD) and healthy volunteers was studied. It was shown that frequency of *e4* allele and *e3/e4* genotype is higher in patients with hypertension and myocardial infarction than in the control group. The presence of *e4* allele in genotype leads to a double increase of the risk of CVD development in Karelian population. The association between allele *e4* presence in genotype and CVD development was established.

Key words: Cardiovascular disease (CVD), hypertension, myocardial infarction, apolipoprotein E, restriction length, fragment polymorphism (RLFP) 54

AGRICULTURAL SCIENCE

Ananyev V. A., Grabovik S. I.

PATTERNS OF PLANT COVER FORMATION IN PRIMARY MID-TAIGA SPRUCE FORESTS AFTER TOTAL WINDTHROW

Summary: During the first years after windthrow, selection of the plants capable of growing on bare soils is influenced by several factors: soil humidity, light, site trophic status. The ground cover grows more diverse due to pioneer moss species of the genus *Dicranella* and the genus *Polytrichum*. These species prefer bare soils. It was established that 10 years after total windthrow the understorey on the sites is sufficient (2,000–7,000 trees/ha) for the formation of the primary spruce-dominated forests.

Key words: Primary spruce forests, windthrow, understorey, ground cover 58

Gavrilova O. I., Leontieva E. A.

CORRELATION FOR MEDIUM HEIGHT PINE CROPS AND BIRCH TREES ON CLEAR CUTTINGS OF KARELIA

Summary: The article discusses problems resulting from artificial pine reforestation implemented after clear cuttings on the territories of Prionezhsky, Olonetzky, Pitkyarantky, and Pryzhinsky central forest districts. Models for growing different growth class of medium height were suggested. Correlation for the heights of the broadleaved species in red bilberry and blueberry growing conditions was carried out.

Key words: Artificial reforestation, pine, growth of plants, aspen, birch, clear cutting 64

Erkoeva A. A., Kholoptseva E. S., Drozdov S. N.

SOME ASPECTS OF LIGHT-TEMPERATURE CHARACTERISTICS OF SCOTS PINE SEEDLINGS IN EASTERN FENNOSCANDIA

Summary: Ecological characteristics of Scots pine (*Pinus sylvestris* L.) seedlings from different geographical areas were studied. The effect of variable light-temperature conditions on CO₂-gas-exchange of the plants was researched. It was shown that light-temperature characteristics of the seedlings vary considerably: in southern direction the optimal rate of the net-photosynthesis shifts toward low light intensity, temperatures rise to high values.

Key words: Scots pine seedlings, CO₂-exgange of the whole plant, light-temperature characteristics, optimum and maximum of the net photosynthesis 67

ENGINEERING SCIENCE

Pitukhin E. A., Chikulaev P. S.

MODELING OF SAWN TIMBER VOLUME FACTORING IN STEM RISE-ZONE

Summary: Several types of blank profiles, which are used for wooden panel gluing, including the so-called rise-zone of the tree stem are described in the article. Formulas for the corresponding volumes of sawn timber were calculated. Using simulation methods the optimal parameters of the blanks providing the maximum output volume of the lot were found.

Key words: Rise-zone of the stem, tree top diameter, sawn-timber volume, wooden wastes, blanks for gluing, wooden panel, simulation, optimization 71

Podrigalo M. A., Klets D. M., Nemtsev V. V.

INFLUENCE OF DIFFERENCE BETWEEN DRIVE WHEELS' ROLLING RESISTANCE COEFFICIENTS ON AUTOMOBILE STABILITY AGAINST SKIDDING

Summary: Influence of difference between coefficients of rolling resistance of the left and right drive wheels on the stability of the car against skidding was studied. Dependencies that relate values of the locking interaxial coefficients, values of the drive wheels rolling resistance coefficients, and geometry of the car were developed.

Key words: Stability, rolling resistance, differential, skidding 76

Shegelman I. R., Budnik P. V.

JUSTIFICATION OF MANIPULATOR LENGTH AND WORKING REGIMES OF FELLING-AND-SKIDDING PROCESSING MACHINE

Summary: Optimal values of the maximal manipulator length for a new forest harvesting machine are considered in the article. Furthermore, optimal values of the maximal manipulator length are counted for different natural production conditions.

Key words: Length of manipulator, optimal, new harvesting forest machine, time of guidance, capture tree, loading in conics 81

PHYSICS AND MATHEMATICS

Zhukov A. V., Gusev O. V.

ADJUSTING ALGORITHM FOR FILTERING REQUESTS TO RESOURCE-INTENSIVE WEB-SERVICES BASED ON ALGEBRAIC EQUATIONS

Summary: The article is concerned with the problems of stable web-service operations under critical load conditions characterized by the amount of requests exceeding the servers processing capacity. The adjusting methods recommended earlier are not always applicable due to the use of linear optimization models. The article presents algorithms enabling in some cases simplification of the filtering problems by means of algebraic equations.

Key words: Traffic filtering, computer networks, server overload 84

Kirillov A. N.

MODELLING OF CONTROLLED DYNAMICS FOR GROUPS OF PERIODIC REACTORS

Summary: The control problem of the periodic pulp manufacturing process is considered. The mathematical model of the boiling reactors' dynamics is constructed. The control algorithm for concerted functioning of the technological line is proposed.

Key words: Control, pulp, mathematical model, dynamics, reactor 89

Plaksina N. V.

EQUILIBRIUM PRICES FOR PROVIDERS IN QUEUING SYSTEM

Summary: The article researches a model of the queuing system. The model consists of two subsystems M/M/1 granting two different services (products). These services are complementary and a customer has no benefit from obtaining just one of them. The equilibrium prices and provider's profits depending upon service time are determined.

Key words: Game theory, queuing theory, complementary product, equilibrium prices 92

Vapirov V. V., Sergeeva O. V., Vapirova N. V.

KINETIC STUDY OF REACTION BETWEEN HEXACHLOROCYCLOTRIPHOSPHAZENE AND O-NUCLEOPHILES

Summary: The study of kinetic and thermodynamic features in reaction between hexachlorocyclotriphosphazene and 4-methyl-pyridine-N-oxide in polar and nonpolar solvents was carried out. It was established that the replacement reaction follows $S_N2(P)$ mechanism.

Key words: Phosphazene, chemical kinetics, reaction mechanism, reaction rate 95

Sysun V. I., Ignakhin V. S.

ON RADIAL DRIFT THEORY OF IONIC CURRENT TO PROBE: I. ALLOWANCE FOR VOLUME IONIZATION

Summary: The present work considers ionic current to spherical and cylindrical probes with allowance for ionization in the disturbed region of plasma. The expression describing the concentration of ions was obtained by the approximation of cold ions taking into account their production. The current-voltage characteristics of probes were calculated for a wide range of parameters (probe size, ionization frequency). Some approximate expressions were obtained for dependences of ion current density on ionization frequency.

Key words: Probe diagnostic, low pressure plasma, radial drift theory, disturbed region, volume ionization. 98

All-Russian seminar for young Russian scientists "Problems of Electrodischarge Processing Application in the Industry of Nonesystems and Nanomaterials"

Dyatko N. A.

MODIFICATION OF POLYMER FILMS' SURFACE WITH GAS-DISCHARGE PLASMA: METHODS OF SURFACE CHARACTERIZATION AND PROBLEMS OF MODELLING

Summary: In present paper some methods used for the characterization of the surface of polymer films treated in gas discharge plasma are considered. Results, typical for this kind of study, are presented, and experimentally measured parameters which can be obtained in simulations are pointed out. Problems of modeling are also discussed, and the kinetic model for the interaction of the air plasma of the atmospheric pressure with polypropylene film surface is described.

Key words: Discharge, plasma, polymer film, modification, modelling 103

JUBILATION

To the 50th anniversary of N. V. Dorshakova 113

To the 70th anniversary of V. V. Schiptsov 114

INFO FOR THE AUTHORS. 115