



2018

*Теоретическая  
и прикладная*

**ЭКОЛОГИЯ**

ISSN 1995-4304 (PRINT)  
ISSN 2618-8406 (ONLINE)

**№ 4**

Theoretical and  
Applied Ecology



ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ  
ПРОБЛЕМЫ  
ЭКОЛОГИИ

МЕТОДОЛОГИЯ  
И МЕТОДЫ  
ИССЛЕДОВАНИЙ.  
МОДЕЛИ  
И ПРОГНОЗЫ

МОНИТОРИНГ  
АНТРОПОГЕННО  
НАРУШЕННЫХ  
ТЕРРИТОРИЙ

ЭКОЛОГИЗАЦИЯ  
ПРОИЗВОДСТВА

АГРОЭКОЛОГИЯ

СОЦИАЛЬНАЯ  
ЭКОЛОГИЯ

ПОПУЛЯЦИОННАЯ  
ЭКОЛОГИЯ

ЭКОТОКСИКОЛОГИЯ

РЕЦЕНЗИИ

ОБЩЕСТВЕННО-НАУЧНЫЙ ЖУРНАЛ

<http://envjournal.ru>



Включение журнала «Теоретическая и прикладная экология» в 2018 году в перечень 100 лучших российских научных журналов, в рамках реализации ФЦП «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса на 2014–2020 годы», налагает особую ответственность на редакцию и весь издательский коллектив. С целью дальнейшего развития журнала, перехода на более высокий квартал в международной наукометрической базе данных Scopus, а также включения издания в базу Web of Science Core Collection существенно изменена редакционная коллегия, расширен состав рецензентов за счёт включения высокорейтинговых учёных из ведущих российских и зарубежных вузов и НИИ. В текущем году увеличилось количество публикаций иностранных авторов, а также статей с англоязычной составляющей. В связи с повышением требований к качеству поступающих от авторов рукописей, значительно повысилось качество публикуемых в журнале статей. Для большей визуализации представленных на страницах издания материалов, увеличено количество цветных вкладок, что позволяет более детально иллюстрировать содержание статей, дополнительно используя фотографии, схемы и рисунки.

Модифицирован и активно функционирует сайт журнала – <http://envjournal.ru>.

Для удобства поиска публикаций в сети Интернет каждой статье во всех выпусках журнала присваивается индекс DOI, а также приводится идентификатор ORCID для авторов. Благодаря многим качественным изменениям журнал включён в базу данных RSCI на платформе Web of Science.

Впервые в этом году журнал провёл конкурс «Лучшая научная статья – 2018». По мнению компетентного жюри, победителями конкурса в номинации «Научные обзоры» признаны:

● Дымов А.А., Абакумов Е.В., Безкоровайная И.Н., Прокушкин А.С., Кузяков Я.В., Милановский Е.Ю. за статью «Impact of forest fire on soil properties (review)»;

● Гулевич А.А., Баранова Е.Н., Широких И.Г., Широких А.А. за статью «Генно-инженерный подход в решении «неразрешимых» задач ремедиации почв»;

● Шитиков В.К., Зинченко Т.Д. за статью «Многомерный статистический анализ экологических сообществ».

В номинации «Экспериментальные статьи» победителями стали:

● Головки Т.К., Шелякин М.А., Захожий И.Г., Табаленкова Г.Н., Пыстина Т.Н. за статью «Реакция лишайников на загрязнение среды при добыче бокситовой руды в таёжной зоне»;

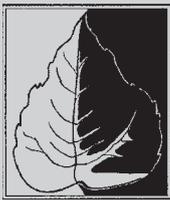
● Дабах Е.В. за статью «Почвообразование на техногенных озёрных илах»;

● Ильчибаева К.В., Кунсбаева Д.Ф., Аллагуватова Р.З., Фазлутдинова А.И., Полохин О.В., Сибирина Л.А., Гончаров А.А., Синх Р., Гайсина Л.А. за статью «Preliminary data on algae and cyanobacteria of volcanic soils in the Kuril Islands».

По итогам проведения внутреннего редакционного конкурса отмечены лучшие рецензенты, представившие в редакцию наиболее глубокие, взвешенные и конструктивные отзывы на поступившие рукописи, которые позволили авторам не только устранить имевшиеся недочёты, но и поднять свои статьи на новый качественный уровень.

Редакция журнала «Теоретическая и прикладная экология» планирует и в дальнейшем прилагать все усилия к совершенствованию журнала, развивать творческие контакты с ведущими отечественными и зарубежными учёными, улучшать технологию предпечатной подготовки за счёт использования современных технических и программных средств, активнее устанавливать и развивать связи с отечественными и международными ассоциациями научных издателей.

Главный редактор журнала, профессор  
Т. Я. Ашихмина



Журнал включён в Перечень ведущих рецензируемых научных журналов и изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание учёных степеней доктора и кандидата наук (№ 1959 по состоянию на 13.08.2018).

Журнал включён в каталог периодических изданий Ульрих (Ulrich's Periodicals Directory), в библиографические базы Scopus (SourceID 21100828916), RSCI на платформе WoS, Google Scholar и Российский индекс научного цитирования (РИНЦ).

Журнал включён в 100 научных журналов, отобранных для реализации программ развития в 2018 г. (государственный контракт от 28.08.2017 № 14.597.11.0035).

Журнал издаётся с 2007 года.

Учредители журнала: ООО Издательский дом «Камертон», ФГБОУ ВО «Вятский государственный университет».

**Главный редактор Т.Я. Ашихмина**, д.т.н., профессор, зав. лабораторией Вятского государственного университета, зав. лабораторией Института биологии Коми НЦ УрО РАН

**Зам. главного редактора Л.И. Домрачева**, д.б.н., профессор Вятской государственной сельскохозяйственной академии

**Зам. главного редактора С.В. Дёгтева**, д.б.н., Институт биологии Коми НЦ УрО РАН

**Зам. главного редактора И.Г. Широких**, д.б.н., зав. лабораторией Федерального аграрного научного центра Северо-Востока им. Н.В. Рудницкого

**Зам. главного редактора Б.И. Кочуров**, д.г.н., профессор, ведущий научный сотрудник Института географии РАН

**Ответственный секретарь С.Г. Скугорова**, к.б.н., научный сотрудник Института биологии Коми НЦ УрО РАН

**Технические секретари**

**Т.И. Кутявина**, к.б.н., старший научный сотрудник Вятского государственного университета,

**А.С. Тимонов**, научный сотрудник Института биологии Коми НЦ УрО РАН

По вопросам публикации статей обращаться:  
610000, г. Киров, ул. Московская, 36.  
Тел. (8332) 37-02-77. E-mail: envjournal@vyatsu.ru

Статьи рецензируются. Перепечатка без разрешения редакции запрещена, ссылки на журнал при цитировании обязательны. Редакция не несёт ответственности за достоверность информации, содержащейся в рекламных объявлениях.

Издание зарегистрировано Федеральной службой по надзору в сфере связи, информационных технологий и массовых коммуникаций. Свидетельство о регистрации ПФ № ФС 77-29059. Подписные индексы 82027, 48482 в каталоге Агентства «Роспечать». Зарубежная подписка оформляется через фирмы-партнёры ЗАО «МК-ПЕРИОДИКА» по адресу: 129110, г. Москва, ул. Гиляровского, 39. Тел.: (495) 281-91-37, 281-97-63. E-mail: info@periodicals.ru; <http://www.periodicals.ru>

Подготовлен к печати в издательстве ООО «О-Краткое» 610000, г. Киров, Динамовский проезд, 4, оф. 101. Оригинал-макет – Татьяна Коршунова, фото на обложке – Александр Широких, перевод – Григорий Кантор, администратор сайта журнала – Вячеслав Рутман выпускающий редактор – Мария Зелаева. Директор издательства «О-Краткое» Евгений Дрогов © Оформление. Издательство «О-Краткое»

Подписано в печать 12.11.2018. Тираж 1150 экз. Заказ № 869.

Отпечатано в ООО «Кировская цифровая типография» 610017, г. Киров, ул. Молодой Гвардии, 57 а

## ЧЛЕНЫ РЕДАКЦИОННОЙ КОЛЛЕГИИ:

- В.А. Алексеев** д.т.н., профессор Ижевского государственного университета
- А.М. Асхабов** д.г.-м.н., академик РАН, научный руководитель Президиума Коми НЦ УрО РАН
- Т.К. Головкин** д.б.н., профессор, главный научный сотрудник Института биологии Коми НЦ УрО РАН
- А. Гросс** д.х.н., профессор Орхусского университета (Дания)
- М.В. Дородников** к.с.-х. н., научный сотрудник Университета Гёттингена им. Георга Августа (Германия)
- И.Е. Дубовик** д.б.н., профессор Башкирского государственного университета
- Г.П. Дудин** д.б.н., профессор, зав. кафедрой Вятской государственной сельскохозяйственной академии
- Г.А. Евдокимова** д.б.н., профессор, заместитель директора Института проблем промышленной экологии Севера Кольского НЦ РАН
- Г.М. Зенова** д.б.н., профессор Московского государственного университета им. М.В. Ломоносова
- Г.Я. Кантор** к.т.н., научный сотрудник Института биологии Коми НЦ УрО РАН
- В.Л. Коваленко** к.т.н., доцент Украинского государственного химико-технологического университета
- Е.Ю. Колбовский** д.г.н., профессор, ведущий научный сотрудник Московского государственного университета им. М.В. Ломоносова
- Э.И. Коломиец** д.б.н., академик НАН Беларуси, директор Института микробиологии НАН Беларуси
- Л.В. Кондакова** д.б.н., профессор Вятского государственного университета
- В.А. Коток** к.т.н., доцент Украинского государственного химико-технологического университета
- А.В. Кучин** д.х.н. член-корр. РАН, профессор, зав. отделом и зав. лабораторией Института химии Коми НЦ УрО РАН
- В.Н. Лаженцев** д.г.н., академик РАН, профессор, советник РАН
- В.З. Латыпова** д.х.н., член-корр. Академии наук Республики Татарстан, профессор Казанского федерального университета
- Ли Юй** профессор, директор Института микологии Цзилинского аграрного университета, иностранный член РАН (КНР)
- С.Г. Литвинцев** к.с.-х.н., проректор ВятГУ
- В.А. Малинников** д.т.н., профессор Московского государственного университета геодезии и картографии
- А.А. Москалёв** д.б.н. член-корр. РАН, зав. лабораторией Института биологии Коми НЦ УрО РАН
- С.В. Пестов** к.б.н., доцент Вятского государственного университета
- В.С. Петросян** д.х.н., профессор, зав. лабораторией Московского государственного университета
- С.А. Рубцова** д.х.н., директор Института химии Коми НЦ УрО РАН
- В.П. Савиных** д.т.н., член-корр. РАН, профессор, президент Московского государственного университета геодезии и картографии, лётчик-космонавт, дважды Герой СССР
- Ф. Скапини** д.б.н., профессор Университета Флоренции (Италия)
- В.А. Сысуев** д.т.н., академик РАН, научный руководитель Федерального аграрного научного центра Северо-Востока им. Н.В. Рудницкого
- В.А. Терехова** д.б.н., ведущий научный сотрудник Института проблем экологии и эволюции им. А.Н. Северцова РАН
- Т.А. Трифонова** д.б.н., профессор Московского государственного университета им. М.В. Ломоносова
- Б.Н. Хойницки** д.б.н., профессор Познаньского университета наук о жизни (Польша)
- В.И. Холстов** д.х.н., руководитель центра аналитических исследований по Конвенциям о запрещении химического оружия ФГУП «ГосНИИОХТ»
- М.Х. Хусейн** д.б.н., профессор Университета Ассиут (Египет)



# Theoretical and applied ECOLOGY

No. 4, 2018

The journal is included in the list of the leading peer-reviewed journals and issues for publishing the main results of research for PhD and doctoral dissertations (No. 1959 on August 13, 2018).

The journal is included into Ulrich's Periodicals Directory, bibliographic databases Scopus (SourceID 21100828916), RSCI on WoS, Google Scholar and Russian Science Citation Index (RSCI).

The journal is included in the list of 100 scientific journals selected for the implementation of development programs in 2018 (the state contract No. 14.597.11.0035 of August 28, 2017).

The journal is published since 2007.

The founders of the journal:  
Publishing house "Kamerton", Vyatka State University

**Editor-in-Chief T.Ya. Ashikhmina,**

Doctor in Technical Sciences, Professor, Vyatka State University, Institute of Biology of the

Komi Science Centre of the Ural Branch of RAS

**Vice-Editor-in-Chief L.I. Domracheva,**

Doctor in Biology, Professor of Vyatka State Agricultural Academy

**Vice-Editor-in-Chief S.V. Degteva,**

Doctor in Biology, Institute of Biology of the Komi Science Centre of the Ural Branch of RAS

**Vice-Editor-in-Chief I.G. Shirokikh,**

Doctor in Biology, Federal Agricultural Research Center of North-East named N.V. Rudnitsky

**Vice-Editor-in-Chief B.I. Kochurov,**

Doctor in Geography, Professor, the leading researcher of the Institute of Geography RAS

**Executive Secretary S.G. Skugoreva,**

PhD in Biology, researcher of Institute of Biology of the Komi Science Centre of the Ural Branch of RAS

**Technical Secretaries:**

**T.I. Kutyavina,** PhD in Biology, senior researcher of Vyatka State University,

**A.S. Timonov,** researcher of Institute of Biology of the Komi Scientific Center of the Ural Branch of RAS

The articles are reviewed. Reprint without permission of the publisher is prohibited, links to the journal are obligatory when citing.

The editorial Board is not responsible for the accuracy of the information contained in advertisements.

Address: 36 Moskovskaya St., Kirov, 610000  
phone/fax: (8332) 37-02-77, e-mail: envjournal@vyatsu.ru

The edition is registered by Federal service for supervision in the sphere of communication, information technology and mass communications. Certificate of PF registration № FS 77-29059

Subscription index 82027, 48482  
in the catalogue of Agency «Rospechat»

To effect subscription it is necessary to address to one of the partners of JSC «MK-Periodica» in your country or to JSC «MK-Periodica» directly.  
Address: 39 Gilyarovskiy St., Moscow, Russia, 129110.  
Tel: (495) 281-91-37, 281-97-63, Fax: (495) 281-37-98  
E-mail address: info@periodicals.ru. <http://www.periodicals.ru>

Prepared for publication by the publishing house of «O-Kratkoe» of. 101, 4 Dynamoskiy proezd, Kirov, 610000  
Tel. +7 (8332) 32-28-39. E-mail: okrat@okrat.ru.

Designer – Tatiana Korshunova. Cover photo – Alexandr Shirokikh.  
Translation – Grigoriy Kantor. Administrator of Web site – Vyacheslav Rutman. Managing editor – Mariya Zelayeva  
Director of the publishing house «O-Kratkoe» Evgeniy Drogov  
© Publishing house «O-Kratkoe»

Printed in «Kirov digital printing house»  
57 a Molodoy Gvardii St., Kirov, 610017

## THE EDITORIAL BOARD OF THE JOURNAL «THEORETICAL AND APPLIED ECOLOGY»

- V.A. Alexeev** Doctor in Technical Sciences, Professor of Udmurt State University
- A.M. Askhabov** Doctor in Geology and Mineralogy, Academician of RAS, scientific director of the Komi Science Centre of the Ural Branch of RAS
- T.K. Golovko** Doctor in Biology, Professor, the Chief Researcher of Institute of Biology of Komi Scientific Centre of Ural Branch of RAS
- A. Gross** Doctor in Chemistry, Professor of Aarhus University (Denmark)
- M.V. Dorodnikov** PhD in Agricultural Sciences, Georg August University of Göttingen (Germany)
- I.E. Dubovik** Doctor in Biology, Professor of Bashkir State University
- G.P. Dudin** Doctor in Biology, Professor of Vyatka State Agricultural Academy
- G.A. Evdokimova** Doctor in Biology, Professor, Vice-Director of Research Institute of the North Industrial Ecology, Kola SC of RAS
- G.M. Zenova** Doctor in Biology, Professor of Lomonosov Moscow State University
- G.Ya. Kantor** PhD in Technical Sciences, researcher of the Institute of Biology of the Komi Science Centre of the Ural Branch of RAS
- V.L. Kovalenko** PhD in Technical Sciences, Associate Professor of Ukrainian State University of Chemical Technology
- E.Yu. Kolbovsky** Doctor in Geography, the leading researcher, Professor of Lomonosov Moscow State University
- E.I. Kolomiychuk** Doctor in Biology, corresponding member of the National Academy of Sciences of Belarus, Director of Institute of Microbiology, National Academy of Sciences of Belarus
- L.V. Kondakova** Doctor in Biology, Professor of Vyatka State University
- V.A. Kotok** PhD in Technical Sciences, Associate Professor of Ukrainian State University of Chemical Technology
- A.V. Kuchin** Doctor in Chemistry, corresponding member of RAS, Professor, scientific director Institute of Chemistry of the Komi Science Centre of the Ural Branch of RAS
- V.N. Lazhentsev** Doctor in Geography, Professor, RAS Advisor
- V.Z. Latypova** Doctor in Agriculture, corresponding member of Tatarstan Academy of Sciences, Professor of Kazan Federal University
- Li Yu** Professor, Director of Mycology Institute of Jilin Agricultural University, Foreign Associate of RAS (China)
- S.G. Litvinets** PhD in Agricultural Sciences, Vice-Rector for Science and Innovation of Vyatka State University
- V.A. Malinnikov** Doctor in Technical Sciences, Professor of Moscow State University of Geodesy and Cartography
- AA. Moskalev** Doctor in Biology, corresponding member of RAS, Chief of the Laboratory of Institute of Biology of the Komi Science Centre of the Ural Branch of RAS
- S.V. Pestov** PhD in Biology, Associate Professor of Vyatka State University
- V.S. Petrosyan** Doctor in Chemistry, Professor, Head of laboratory in Moscow State University
- S.A. Rubtsova** Doctor in Chemistry, Director of the Institute of Chemistry the Komi Science Centre of the Ural Branch of RAS
- V.P. Savinykh** Doctor in Technical Sciences, corresponding member of RAS, Professor, President of Moscow State University of Geodesy and Cartography, Pilot-Cosmonaut, twice Hero of the Soviet Union
- F. Scapini** Doctor in Biology, Professor of Florence University (Italy)
- V.A. Sysuev** Doctor in Technical Sciences, Academician of RAS, scientific director Federal Agricultural Research Center of North-East named N.V. Rudnitsky
- V.A. Terekhova** Doctor in Biology, leading researcher of A.N. Severtsov Institute of Ecology and Evolution of RAS
- T.A. Trifonova** Doctor in Biology, Professor of Lomonosov Moscow State University
- V.I. Kholstov** Doctor in Chemistry, Professor, Head of the Center for Analytical Studies on the Conventions on the Prohibition of Chemical Weapons of the Federal State Unitary Enterprise "State Scientific Research Institute of Organic Chemistry and Technology"
- B.H. Chojnicki** Doctor in Biology, Professor of Poznan University of Life Sciences (Poland)
- M.H. Hussein** Doctor in Biology, Professor of Assiut University (Egypt)

# СОДЕРЖАНИЕ

## ОБЗОРЫ

- Н. В. Дудчик, С. И. Сычик, В. В. Шевляков*  
Прокариотические тест-модели в экотоксикологических исследованиях: перспективы и классификация (обзор) .....5
- А. А. Думов, Е. В. Абакумов, И. Н. Безкороваунава, А. С. Прокушкин, Ya. V. Kuzyakov, E. Yu. Milanovsky*  
Impact of forest fire on soil properties (review) .....13

## СТАТЬИ

- В. А. Сысоев, А. В. Алёшкин, Ю. В. Сычугов, А. Ю. Исупов*  
Комбинированные расчётные схемы в математических моделях процессов фракционирования зерна .....24
- Е. В. Дабах* Почвообразование на техногенных озёрных илах .....30
- А. Р. Сукиасян* Влияние содержания тяжёлых металлов в воде малых рек, используемой для полива кукурузы армянской популяции .....40
- Т. А. Adamovich, E. V. Tovstik, E. S. Soloveva, T. Ya. Ashikhmina, G. I. Berezin, A. M. Prokashev, V. P. Savinykh* Assessment of the state of soils in specially protected natural reservations of the Kirov region .....46
- Л. М. Шапошникова* Фитопоглощение радия-226 из техногенно загрязнённых почв на примере *Chamaenerion angustifolium*, *Lathirus pratensis* и *L. vernus* .....53
- Yu. N. Terentyev, N. V. Syrchina, N. N. Bogatyryova, T. Ya. Ashikhmina, A. V. Sazanov, M. L. Sazanova, V. N. Pugach, V. A. Kozvonin, A. A. Burkov* The use of glauconite for stabilization and improvement of ammonium nitrate agrochemical properties .....61
- Э. Х. Сакаева, Ю. В. Куликова, Л. В. Рудакова*  
Биодеструкция полимерных композиционных материалов микроскопическими грибами .....68
- Л. М. Щуклина, Г. М. Батракова, Т. В. Нурисламова*  
Исследование процессов миграции и трансформации смазочно-охлаждающих жидкостей в почве урбанизированной территории .....76
- Е. С. Ширинкина* Получение экологически безопасных строительных материалов с использованием осадков сточных вод целлюлознобумажного производства .....85
- Л. В. Кондакова, Л. И. Домрачева, Т. Я. Ашихмина, В. С. Симакова* Биомониторинговые возможности микроорганизмов при оценке степени токсичности синтетических поверхностно-активных веществ .....93
- A. L. Podolsky* Applying songbird population dynamics models to conservation biology needs .....99
- N. P. Savinykh, E. V. Lelekova, M. N. Shakleina* About the promotion of natural restoration of *Pinus sylvestris* L. ....108
- Е. В. Товстик, И. Г. Широких, Е. С. Соловьёва, А. А. Широких, Т. Я. Ашихмина, В. П. Савиных*  
Изменение почвенной актинобиоты под влиянием инвазии борщевика Сосновского .....114
- К. V. Ichibaeva, D. F. Kunsbaeva, R. Z. Allagwatova, A. I. Fazlutdinova, O. V. Polokhin, L. A. Sibirina, A. A. Gontcharov, P. Singh, L. A. Gaysina* Preliminary data about algae and cyanobacteria of volcanic soils on Kuril Islands .....119
- М. А. Азямов* Возможность частичной замены антибиотиков биологически активными веществами при лечении клинических маститов у коров .....127

ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ  
ПРОБЛЕМЫ  
ЭКОЛОГИИ

МЕТОДОЛОГИЯ  
И МЕТОДЫ  
ИССЛЕДОВАНИЙ.  
МОДЕЛИ И  
ПРОГНОЗЫ

МОНИТОРИНГ  
АНТРОПОГЕННО  
НАРУШЕННЫХ  
ТЕРРИТОРИЙ

ЭКОЛОГИЗАЦИЯ  
ПРОИЗВОДСТВА

ЭКОТОКСИКОЛОГИЯ

ПОПУЛЯЦИОННАЯ  
ЭКОЛОГИЯ

СОЦИАЛЬНАЯ  
ЭКОЛОГИЯ

# CONTENTS

## THEORETICAL PROBLEMS OF ECOLOGY

## METHODOLOGY AND RESEARCH METHODS. MODELS AND FORECASTS

## MONITORING OF ANTHROPO- GENICALLY DISTURBED AREAS

## GREENING OF PRODUCTION

## ECOTOXICOLOGY

## POPULATION ECOLOGY

## SOCIAL ECOLOGY

### REVIEWS

- N. V. Dudchik, S. I. Sychik, V. V. Shevlyakov* Prokaryotic test-models for environmental ecotoxicological research: prospects and classification (review) ..... 5
- A. A. Dymov, E. V. Abakumov, I. N. Bezkorovaynaya, A. S. Prokushkin, Ya. V. Kuzyakov, E. Yu. Milanovsky* Impact of forest fire on soil properties (review) ..... 13

### ARTICLES

- V. A. Sysuev, A. V. Aleshkin, Y. V. Sychugov, A. Y. Isupov* Combined calculation schemes in mathematical models the fractionation of grain ..... 24
- E. V. Dabakh* Soil formation on technogenic lake sediments ..... 30
- A. R. Sukiasyan* Influence of heavy metals content in water of small rivers used for irrigation of maize of Armenian population ..... 40
- T. A. Adamovich, E. V. Tovstik, E. S. Soloveva, T. Ya. Ashikhmina, G. I. Berezin, A. M. Prokashev, V. P. Savinykh* Assessment of the state of soils in specially protected natural reservations of the Kirov region ..... 46
- L. M. Shaposhnikova* Phytoabsorption of radium-226 from technogenically contaminated soils by the example of *Chamaenerion angustifolium*, *Lathyrus pratensis* and *L. vernus* ..... 53
- Yu. N. Terentyev, N. V. Syrchina, N. N. Bogatyryova, T. Ya. Ashikhmina, A. V. Sazanov, M. L. Sazanova, V. N. Pugach, V. A. Kozvonin, A. A. Burkov* The use of glauconite for stabilization and improvement of ammonium nitrate agrochemical properties ..... 61
- E. Kh. Sakaeva, Yu. V. Kulikova, L. V. Rudakova* Biodegradation of polymeric composite materials by microscopic fungi ..... 68
- L. M. Shchuklina, G. M. Batrakova, T. N. Nurislamova* Study of migration and transformation of greasing and cooling fluids in the soil of urbanized area ..... 76
- E. S. Shirinkina* Production of environmentally friendly building materials with use of pulp and paper sludge ..... 85
- L. V. Kondakova, L. I. Domracheva, T. Ya. Ashikhmina, V. S. Simakova* Biomonitoring capabilities of microorganisms when assessing the degree of toxicity of synthetic surfactants ..... 93
- A. L. Podolsky* Applying songbird population dynamics models to conservation biology needs ..... 99
- N. P. Savinykh, E. V. Lelekova, M. N. Shakleina* About the promotion of natural restoration of *Pinus sylvestris* L. .... 108
- E. V. Tovstik, I. G. Shirokikh, E. S. Soloveva, A. A. Shirokikh, T. Ya. Ashikhmina, V. P. Savinykh* The change in soil actinobiote under the influence of *Heracleum sosnowskyi* invasion .... 114
- K. V. Ilchibaeva, D. F. Kunsbaeva, R. Z. Allaguvatova, A. I. Fazlutdinova, O. V. Polokhin, L. A. Sibirina, A. A. Gontcharov, P. Singh, L. A. Gaysina* Preliminary data about algae and cyanobacteria of volcanic soils on Kuril islands ... 119
- M. A. Aziamov* The partial replacement of antibiotics with biologically active substances at treatment of cows' mastitis .... 127

## Прокариотические тест-модели в экотоксикологических исследованиях: перспективы и классификация (обзор)

© 2018. Н. В. Дудчик, д. б. н., зав. лабораторией,  
С. И. Сычик, к. мед. н., директор,  
В. В. Шевляков, д. мед. н., гл. н. с.,  
Республиканское унитарное предприятие  
«Научно-практический центр гигиены»,  
220012, Республика Беларусь, г. Минск, ул. Академическая, 8,  
e-mail: n\_dudchik@mail.ru, n\_dudchik@tut.by

Биологическое моделирование в системной экологии является эффективной технологией оценки биологического действия факторов окружающей среды. В работе дано концептуальное обоснование разработки прокариотических лабораторно-аналитических моделей, оценены преимущества и ограничения их экспериментального использования. Предложена классификация прокариотических тест-моделей по уровню структурно-экологической организации, свойствам тест-объекта (клетки, сообщества, популяции, микробиоценоз) и совокупности тест-реакций (биоиндикаторов и биомаркеров). Дано определение тест-модели как единой системы, включающей тест-организм, систему биомаркеров / биоиндикаторов, методику испытаний в соответствии с принципами надлежащей лабораторной практики, критериальный аппарат для качественной/количественной оценки факторов окружающей среды разной природы. Обоснованы понятия субпопуляционных и надпопуляционных тест-моделей, основанных на свойствах микробных сообществ как целостных биологических единиц, регулирующих параметры жизнедеятельности в зависимости от внешних факторов. Показано, что микроорганизмы являются релевантными тест-объектами для разработки инновационных методик оценки влияния на организм факторов среды физической, химической и биологической природы, что основано на особенностях структурно-экологической организации и многообразии метаболических, динамических, морфологических, молекулярно-генетических и других свойств микроорганизмов, целостности микробной культуры как системы, циклическом развитии популяций микроорганизмов в природе и их постоянном взаимодействии с факторами окружающей среды.

**Ключевые слова:** микробиотесты, прокариотические тест-модели, классификация, биомаркеры, биоиндикаторы, ассоциации микроорганизмов.

## Prokaryotic test models for environmental ecotoxicological research: prospects and classification (review)

© 2018. N.V. Dudchik ORCID: 0000-0002-5877-9307,  
S. I. Sychik ORCID: 0000-0003-1083-8993,  
V. V. Shevlyakov ORCID: 0000-0001-8226-9350,  
Republican Unitary Enterprise,  
“The Scientific and Practical Center of Hygiene”,  
8, Akademicheskaya St., Minsk, Republic of Belarus, 220012,  
e-mail: n\_dudchik@tut.by, n\_dudchik@mail.ru

Biological modeling in system ecology is an effective technology for assessing the biological effects of environmental factors. We provided the conceptual justification for the development of prokaryotic laboratory-analytical models, assessed the advantages and limitations of their experimental use. The classification of prokaryotic test models according to the level of the structural and ecological organization, the properties of the test object (cells, communities, populations, microbiocenosis) and a set of test reactions (bioindicators and biomarkers) is proposed. The definitions of the test model as a unified system including a test organism, a biomarker / bioindicator system, a test procedure in accordance with guidelines of good laboratory practice, a criteria apparatus for qualitative / quantitative assessment of environmental factors are given. The concepts of subpopulation and suprapopulation test models based on the properties of microbial communities as integral biological units regulating vital activity parameters depending on external factors are substantiated. It has been shown that microorganisms are relevant test objects for the development of innovative methods for assessing the impact of the physical, chemical and biological environmental factors on organism, which is based on the structural

and ecological organization and the variety of metabolic, dynamic, morphological, molecular-genetic and other properties of microorganisms, integrity microbial culture as a system, cyclical development of populations of microorganisms in environment as well as their complex interaction with environmental factors.

**Keywords:** microbiotests, prokaryotic test-models, classification, biomarkers, bioindicators, associations of microorganisms.

### **Методология прокариотических тест-моделей в экотоксикологических исследованиях в рамках современной концепции системной экологии**

Развитие и обогащение концепции системной экологии как междисциплинарного научного направления на основе холистического подхода ведёт к систематизации связанных с ней экспериментальных прикладных исследований и экспериментального моделирования [1, 2].

В рамках работы проведён анализ и дано развитие концепции биотестирования и биомониторинга на основе прокариотических тест-моделей с учётом принципов микробной доминанты и положений популяционно-коммуникативной парадигмы в микробиологии, обоснована методология экспериментального моделирования с использованием прокариотических тест-моделей в экотоксикологических исследованиях, приведены результаты разработки классификации прокариотических тест-моделей, основанной на особенностях эколого-биологической организации тест-организма, проведён анализ атрибутивных параметров прокариотических тест-моделей на принципах надлежащей лабораторной практики.

Биологическое моделирование является эффективной технологией оценки биологического действия факторов окружающей среды, направленной на изучение взаимодействий в биологических системах с учётом их многокомпонентности, наличия прямых и обратных связей как между составными частями системы, так и эффектами внешних воздействий на систему в целом [3, 4].

Результаты экологических, микробиологических и гидробиологических исследований последних десятилетий показали, что активные антропогенные воздействия привели к значительным долговременным сдвигам в функционировании и свойствах экосистем, при этом было определено критическое значение микробиоты в поддержании экологического равновесия, круговорота веществ и энергии в природе, биодegradации поллютантов разной природы. Уникальные биохимические, физиологические и генетические свойства прокариотических форм живого позволяют рассматривать их в качестве релевантных

тест-моделей для оценки антропогенных воздействий в биотестировании и биомониторинге, что нашло отражение в широком использовании прокариотических тест-моделей в лабораторной практике. В настоящее время сформировались и уже достаточно широко используются в научной литературе термины «микробиотестирование» и «микробиотесты» («микротесты») [5–11]. Однако, несмотря на это, не были предприняты попытки разработки системы классификации прокариотических тест-моделей, не были оценены перспективы использования сложных форм коопераций прокариотических организмов для целей биотестирования и биомониторинга.

Моделирование в системной биологии является одним из основных инструментов как для анализа и интегрирования экспериментальных данных, так и для определения развития системы в условиях, отличных от экспериментальных.

В соответствии с положениями микробной доминанты и популяционно-коммуникативной парадигмы в микробиологии, прокариотические формы организации живой материи занимают ключевое положение в экосистемах в качестве активных деструкторов органического материала, трансформации химических веществ, формировании основных биогеоценозов, что подтверждается преобладанием суммарной биомассы прокариот над биомассой эукариот, способностью микроорганизмов трансформировать и включать в кругооборот многие минеральные и органические вещества, при этом важным феноменом является поддержание фенотипической гетерогенности клеток популяции при стабильности генотипа, целостность микробной культуры как системы в процессе её развития, циклическое развитие популяций микроорганизмов в природе, постоянное взаимодействие и взаимовлияние микробной популяции и факторов окружающей среды (единая система клеток и условий среды) [12–20].

**Термины и определения, используемые для развития концепции экспериментального моделирования на основе прокариотических тест-моделей**

Разработка классификации прокариотических тест-моделей потребовала уточнения

и обоснования некоторых терминов и их определений для чёткого понимания особенностей биологического моделирования как важной части системной экологии и с учётом того, что осмысливание и систематизация значительных объёмов экспериментальных данных неэффективны без привлечения современных технологий, систематизации и обобщения на основе научной методологии [9, 10]. Мы использовали следующие уточнённые и обоснованные термины и их определения.

Тест-модель – единая система, включающая тест-организм (тест-объект), стандартизованный и поддерживаемый в оптимальных условиях, тест-реакцию (систему биомаркеров и/или биоиндикаторов), методику выполнения количественных измерений/или методику качественной оценки в соответствии с известными принципами детекции (оптическим, визуальным, импедиметрическим, основанным на оценке изменений электрохимических параметров тест-системы в процессе тестирования и др.), критериальный аппарат для качественной/количественной оценки воздействия факторов среды (рис. 1).

Тест-объект – выделенный из природной среды или полученный в результате селекции прокариотический организм (консорциум организмов), обладающий чувствительностью к определённому фактору среды обитания или их комплексу, и проявляющий стабильную и достоверно измеряемую тест-реакцию (био-

маркер и биоиндикатор). Тест-реакция – закономерно возникающая ответная реакция тест-объекта на воздействие внешних факторов, выбранная для их оценки, состоящая из биомаркеров и биоиндикаторов.

Биомаркер – биологический ответ на низших уровнях биологической организации (молекулярном, биохимическом, физиологическом), который может обеспечить прямое доказательство воздействия стрессового фактора (краткосрочный ответ). В соответствии с определением Всемирной Организации Здравоохранения, биомаркер – это измеряемый показатель, отражающий взаимодействие между биологической системой и фактором окружающей среды (химический, физический или биологический). Этот показатель может быть функциональным, физиологическим или биохимическим и отражает взаимодействие на клеточном или молекулярном уровне. Биомаркер – это вещество, молекула, структура или процесс, которые могут быть измерены и коррелируют или связаны закономерными зависимостями с неблагоприятными изменениями в тест-организме или тест-культуре.

Биоиндикатор – биологический ответ на более высоких уровнях организации (консорциума, популяции, сообщества), в ответ на воздействие внешнего фактора (долговременный ответ) и имеет большую биологическую релевантность (приемлемость).

Критериальный аппарат – система формализованных математических (для количественной оценки) или качественных (для качественной оценки) показателей, устанавливающих корреляционные связи или закономерные зависимости воздействия тест-субъекта (внешнего воздействия) на биологическую тест-модель и основанных на оценке биомаркера (биоиндикатора)/системы биомаркеров (биоиндикаторов) и их соотношений. Использование критериального аппарата позволяет проводить системное изучение внешнего воздействия, т. е. факторов среды обитания, давать объективные характеристики этих факторов и выявлять корреляции или закономерные зависимости их биологического действия с помощью тест-моделей.

Популяционные тест-модели – биологические модели, при использовании которых осуществляется воздействие на популяцию микроорганизмов в оптимальной среде и оценка проводится на основании популяционных биоиндикаторов (динамические, кинетические), которые могут быть дополнены биомаркерами (биохимическими, генетическими).

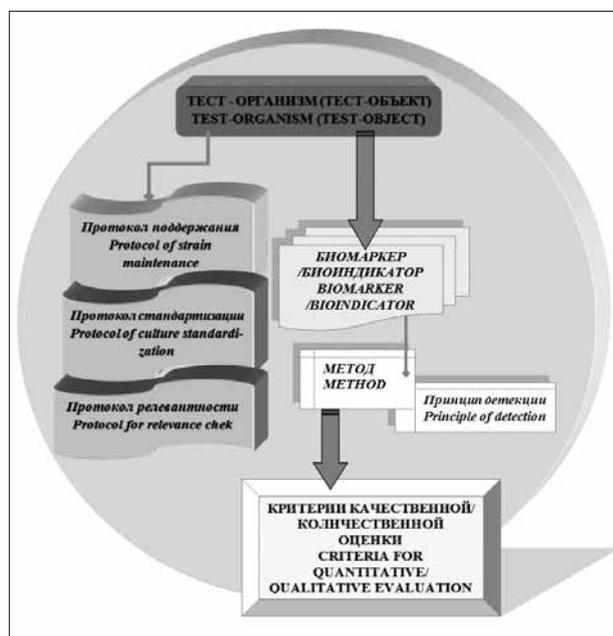


Рис. 1. Схематичное изображение биологической тест-модели и её составных частей [9]

Fig. 1. Schematic representation of the biological test-model and its components [9]

Клеточные тест-модели – биологические модели, при использовании которых осуществляется воздействие на совокупность клеток микроорганизмов, специально подготовленных для оценки воздействия вне оптимальных условий развития, и оценка проводится на основании биомаркеров (жизнеспособность, морфология клетки, тинкториальные признаки).

Субпопуляционные тест-модели – биологические модели, при использовании которых осуществляется воздействие на консорциумы микроорганизмов как целостную биологическую единицу, при этом оценка проводится на основании популяционных биоиндикаторов и клеточных биомаркеров.

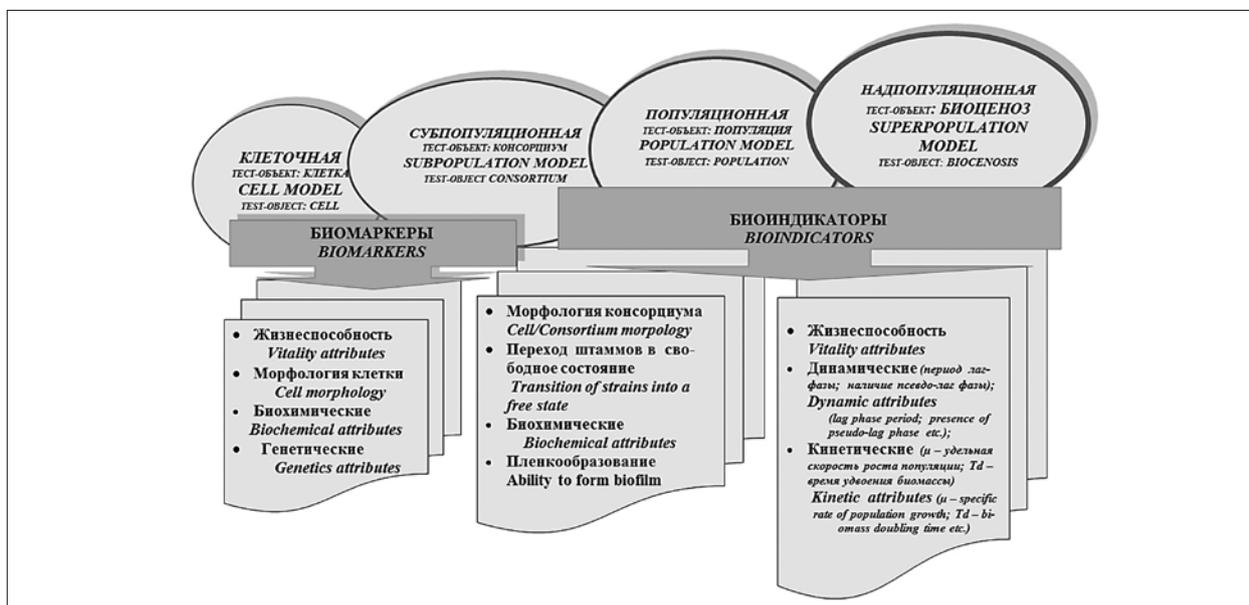
Надпопуляционные тест-модели – биологические модели, при использовании которых осуществляется воздействие на микробиоценозы микроорганизмов как целостную биологическую единицу, при этом оценка проводится на основании надпопуляционных биоиндикаторов, степени межклеточных взаимодействий и клеточных биомаркеров.

**Классификация прокариотических тест-моделей, основанная на особенностях эколого-биологической организации тест-организма**

В современной микробиологии как науке происходит эволюционное развитие представления о микроорганизмах как строго одноклеточных организмах к пониманию микробных сообществ как целостных пространственно-функциональных структур со способностью координировать фенотипические признаки в соответствии с изменением параметров внешней среды. Эта способность чаще всего демонстрируется в природной среде обитания микроорганизмов, где они образуют сложные многоклеточные структуры с различным уровнем кооперации: сообщества/консорциумы (биоплёнки, бактериальные маты, плодовые тела и др.) и микробиоценозы [12, 21–26]. «Термин «консорциум» используется для описания различных коопераций микроорганизмов. «В примечании к Правилу 31 в «Международном кодексе номенклатуры бактерий» говорится: «Консорциум – это совокупность или ассоциация двух или более организмов» [12, 27]. Микробиоценоз – сообщество популяций разных таксономических единиц микроорганизмов, структурно локализованных в определённом биотопе, со стабильными количественными и качественными показателями с характерными как синергическими, так и антагонистическими взаимосвязями между членами микробиоценоза [9, 12].

С точки зрения развития методологии биотестирования использование в качестве тест-культур сообществ микроорганизмов имеет ряд преимуществ, так как микроорганизмы в составе сообщества могут менять свои фенотипические характеристики, а сообщество/консорциум микроорганизмов – приобретать новые свойства, не характерные для составляющих его штаммов. Генотипические и фенотипические признаки штаммов, образующих сообщество/консорциум, в значительной степени отличаются от типовых признаков микроорганизмов свободноживущих форм. Это относится к параметрам метаболической активности, способности продуцировать экзогенные ферменты, устойчивости к воздействию факторов внешней среды различной природы), наличие эпидемически значимых маркеров и т. д. Практически значимым является не только использование природных консорциумов, но и селекция консорциумов с заданными свойствами. Разработка научно-методических подходов многоступенчатой селекции в лабораторных условиях по культурально-морфологическим (размер колоний) и физиолого-биохимическим (скорость роста) параметрам с целью получения консорциумов микроорганизмов как тест-моделей в биотестировании, весьма перспективны. Нами накоплен научный и практический опыт использования сообществ/консорциумов микроорганизмов в качестве тест-объектов для оценки интегральной токсичности объектов окружающей среды, токсичности и биологического действия потенциально опасных химических веществ, их сложных смесей. В рабочей коллекции депонированы микроорганизмы, составляющие биоплёнки, выделенные из природной среды. В результате биотестирования с использованием клеточных, популяционных, субпопуляционных тест-моделей выявлены зависимости между чувствительностью ассоциаций/консорциумов и отдельных штаммов к неблагоприятным факторами среды и их способностью к плёнкообразованию, вариабельностью морфологических признаков ассоциаций и составляющих их штаммов [9, 10, 28–31].

Научная гипотеза выделения надпопуляционных и субпопуляционных тест-моделей в отдельные самостоятельные классы заключается в том, что сообщество (консорциум, микробиоценоз) как целостная структура представляет собой новый тип биологической тест-модели. В связи с тем, что под воздействием факторов среды ассоциации могут



**Рис. 2.** Классификация прокариотических тест-моделей по организационному уровню и их эволюционная соподчинённость [9]  
**Fig. 2.** Scheme of classification of biological models at the organizational level and their evolutionary co-ordination [9]

диссоциировать на отдельные составляющие его штаммы, тест-реакциями для разработки субпопуляционного (надклеточного) типа моделей могут являться как популяционные биоиндикаторы, так и клеточные биомаркеры [5, 6, 9, 10, 28–31].

На основе аналитического осмысления собственных экспериментальных данных, критического анализа литературных источников для разработки методологии биотестирования как элемента системной биологии, а также требований надлежащей лабораторной практики, мы предлагаем классификацию прокариотических тест-моделей по уровню структурно-экологической организации (рис. 2).

Вышеперечисленное является основанием отнести прокариотические формы живого к чувствительным мишеням вредного влияния факторов среды обитания как биотической, так и абиотической природы и выделить в отдельный класс прокариотических тест-моделей при проведении биотестирования.

**Атрибутивные параметры прокариотических тест-моделей**

Важно отметить следующие неотъемлемые параметры прокариотических тест-моделей, на основе которых может быть надежно обеспечена комплексная и разносторонняя оценка антропогенных факторов среды обитания методами биотестирования:

– на основе прокариотических организмов могут быть разработаны разные классы

тест-моделей: клеточные, субпопуляционные, популяционные, надпопуляционные;

– прокариотические тест-модели обладают значительным набором маркеров и индикаторов (культурально-морфологических, биохимических, динамических, молекулярно-генетических) и могут быть описаны системой терминов современной геномики, метаболомики и протеомики;

– тест-модели на основе микроорганизмов могут быть дополнены биологическими моделями как более низкого порядка, выполняемыми *in vitro* (клеточные и субклеточные структуры, мембраны, митохондрии и др.), так и более высокого порядка, выполняемыми *in vivo*, основанными на использовании культур клеток, простейших, растительных и животных организмов, что обеспечит оценку измеряемого фактора на всех уровнях биологической организации;

– на основе прокариотических тест-моделей могут быть сформированы как батареи тестов 1 уровня, основанных на использовании одного тест-организма, но с оценкой нескольких маркеров, так и быть частью батарей тестов 2 уровня, включающие несколько тест-организмов с разным уровнем организации, с оценкой соответствующих маркеров;

– процедуры стандартизации и оценка релевантности прокариотических тест-объектов могут быть выполнены в стандартных лабораторных условиях, исключая излишние материальные и временные затраты, так как

культуральные среды недороги, доступны, могут быть оптимизированы по составу для целей выполнения конкретного исследования, а тест занимает от нескольких часов до нескольких суток;

– тест-модели могут быть использованы как для выявления направленности воздействия (стимулирующее, ингибирующее, нейтральное) и выполнены в качественном варианте с использованием одного маркера, так и для количественной оценки внешнего воздействия, при этом может быть оценён ряд маркеров/индикаторов или система маркеров на основе разработанного критериального аппарата;

– тест-объект для разработки модели может быть выделен из окружающей среды, отобран из рабочих коллекций культур микроорганизмов в результате скрининговых исследований, а также целенаправленно селекционирован по заданному признаку чувствительности;

– методы выполнения измерений могут быть разработаны в инструментальном исполнении, что обеспечивает получение объективных и достоверных результатов.

Принципиальным положением для использования биологических тест-моделей является требование её адекватности (релевантности) в отношении изучаемого фактора для получения достоверных результатов. Поэтому мы ставили задачу не только разработать классификацию прокариотических тест-моделей на фундаментальных положениях биологической науки, но и обосновать её целесообразность и эффективность для качественной и количественной оценки внешних воздействий факторов среды обитания методами биотестирования в соответствии с положениями стандарта GLP (Good Laboratory Practice) – надлежащей лабораторной практики, основанной на неукоснительном соблюдении требований разработанного протокола выполнения теста с известными операционными характеристиками (чувствительность и специфичность, прогностическая ценность положительного и отрицательного результата и др.), протоколов поддержания, стандартизации и оценки диапазона тест-реакции (протокол релевантности).

### Заключение

Обоснована классификация прокариотических тест-моделей, основанная на особенностях биологической организации тест-организма, которая определяет клеточные, субклеточные, популяционные и надпопуляционные тест-модели как самостоятельные

классы с характерной системой биомаркеров и/или биоиндикаторов и областью применения для целей биотестирования.

Обоснованы понятия субпопуляционных и надпопуляционных тест-моделей, основанных на свойствах микробных сообществ как целостных биологических единицах, регулирующих параметры жизнедеятельности в зависимости от внешних факторов.

### Литература

1. Corda A.F., Bartkowski B., Beckmann M., Dittrich A., Hermans-Neuman K., Lienhoop N., Locher-Krause K., Priess J., Schröter-Schlaack C., Schwarzaf N., Seppeltad R., Straucha M., Václavík T., Volka M. Towards systematic analyses of ecosystem service trade-offs and synergies: Main concepts, methods and the road ahead // *Ecosystem Services*. 2017. V. 28. P. 264–272.
2. Ye X., Chu J., Zhuang Y., Zhang S. Multi-scale methodology: a key to deciphering systems biology // *Frontiers in Bioscience*. 2005. V. 10. P. 961–965.
3. Wierling C., Herwig R., Lehrach H. Resources, standards and tools for systems biology // *Briefings in functional genomics & proteomics*. 2007. V. 6. No. 3. P. 240–251.
4. Liu E.T. Systems biology, integrative biology, predictive biology // *Cell*. 2005. V. 121. No. 4. P. 505–506.
5. Sumampouw O.J., Risjani Y. Bacteria as indicators of environmental pollution: review // *Int. J. of Ecosystem*. 2014. V. 4 (6). P. 251–258.
6. Caruso G. Microbes and their use as indicators of pollution // *J. of Pollution Effects and Control*. 2013. V. 1. P. 1.
7. Vogrinc D., Vodovnik M., Marinsek-Logar R. Microbial biosensors for environmental monitoring // *Acta argiculturae Slovenica*. 2015. V. 106/2. P. 67–75.
8. Mushunina A.S., Azarova S.V., Yazikov E.G., Parygina I.A. Biotesting of modeled drilling mud as an indicator of environmental risk // *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2016. V. 43 (4). Article number: 43/4/012047.
9. Дудчик Н.В., Дроздова Е.В., Сычик С.И. Альтернативные биологические тест-модели в оценке риска воздействия факторов среды обитания. Минск: Транстехника, 2015. 194 с.
10. Дроздова Е.В., Дудчик Н.В., Сычик С.И., Шевляков В.В. Оценка интегральной токсичности факторов и объектов среды обитания с использованием альтернативных биологических тест-моделей: методология и технологии. Минск. Транстехника, 2017. 216 с.
11. Дудчик Н.В., Шевляков В.В. Прокариотические тест-модели для оценки биологического действия и гигиенической регламентации факторов окружающей среды // *Современные методологические проблемы изучения, оценки и регламентирования факторов окружающей среды, влияющих на здоровье человека: Материалы*

междунар. Форума науч. совета Российской Федерации по экологии человека и гигиене окружающей среды, посвященного 85-летию ФГБУ «НИИ ЭЧ и ГОС им. А.Н. Сысина» Минздрава России 15–16 декабря 2016 г. / Под ред. Ю.А. Рахманина. М. Т. 1. С. 167–189.

12. Гусев М.В. Гуманитарная биология: терминологический словарь (тезаурус) / Под ред. А.В. Олескина. М.: Изд-во Московского университета, 2009. 363 с.

13. Кировская Т.А., Олескин А.В. Популяционно-коммуникативная парадигма в отечественной микробиологии [Электронный ресурс] <http://www.sevin.ru/fundecology/biopolitics/biopol1.html> (Дата обращения: 01.03.2016).

14. Артамонова В.С., Андроханов В.А., Соколов Д.А., Лютых И.В., Булгакова В.В., Бортнникова С.Б., Водолеев А.С. Эколого-физиологическое разнообразие микробных сообществ в техногенно-нарушенных ландшафтах Кузбасса // Сибирский экологический журнал. 2011. № 5. С. 735–746.

15. Taheri-Araghi S., Bradde S., Sauls J.T., Hill N.S., Levin P.A., Paulsson J., Vergassola M., Jun S. Cell-size control and homeostasis in bacteria // *Curr. Biol.* 2017. V. 27. No. 9. P. 1392.

16. Spiesser T.W., Muller C., Schreiber G., Krantz M., Klipp E. Size homeostasis can be intrinsic to growing cell populations and explained without size sensing or signaling // *FEBS J.* 2012. V. 279. No. 22. P. 4213–4230.

17. Дудчик Н.В. Изучение свойств консорциума почвенных микроорганизмов как тест-объектов для оценки интегральной токсичности // Гигиена и санитария. 2012. № 5. С. 82–84.

18. Yin H., Niu J., Ren Y., Cong J., Zhang X., Fan F., Xiao Y., Zhang X., Deng J., Xie M., he Z., Zhou J., Liang Y., Liu X. An integrated insight into the response of sedimentary microbial communities to heavy metal contamination // *Scientific Reports.* 2015. V. 5. Article number: 14266 (2015).

19. Zhang Y., Cong J., Lu H., Yang C., Yang Y., Zhou J., Li D. An integrated study to analyze soil microbial community structure and metabolic potential in two forest types // *PLoS One.* 2014. V. 9. No. 4. P. e93773.

20. Li X., Meng D., Li J., Yin H., Liu H., Liu X., Cheng C., Xiao Y., Liu Z., Yan M. Response of soil microbial communities and microbial interactions to long-term heavy metal contamination // *Environ. Pollut.* 2017. Pt. 1. P. 908–917.

21. Faust K., Raes J. Microbial interactions: from networks to models // *Nature Rev. Microbiology.* 2012. V. 10. No. 8. P. 538–550.

22. Zhu J., Zhang J., Li Q., Han T., Xie J., Hu Y., Chai L. Phylogenetic analysis of bacterial community composition in sediment contaminated with multiple heavy metals from the Xiangjiang River in China // *Mar. Poll. Bull.* 2013. V. 70. No. 1–2. P. 134–139.

23. Liu J., Chen X., Shu H.Y., Lin X.R., Zhou Q.X., Bramryd T., Shu W.S., Huang L.N. Microbial community structure and function in sediments from e-waste contami-

nated rivers at Guiyu area of China // *Environ Pollut.* 2018. V. 235. P. 171–179.

24. Bottos E.M., Vincent W.F., Greer C.W., Whyte L.G. Prokaryotic diversity of arctic ice shelf microbial mats // *Environ. Microbiol.* 2008. V. 10. No. 4. P. 950–966.

25. Дудчик Н.В., Сычик С.И., Емельянова О.А. Тест-модель оценки интегральной токсичности почв, загрязненных солями цинка // *Весті Нацыянальнай акадэміі навук Беларусі. Серыя біялагічных навук.* 2017. № 4. С. 53–57.

26. Дудчик Н.В., Щербинская И.П., Трейлиб В.В., Янецкая С.А., Будкина Е.А., Шедикова О.Е. Оценка цитотоксического действия солей свинца с использованием ферментных тест-систем // *Здравоохранение.* 2010. № 11. С. 45–48.

27. Грузина В.Д. Коммуникативные сигналы бактерий // *Антибиотики и химиотерапия.* 2003. Т. 48. № 10. С. 32–39.

28. Barberan A., Fernandez-Guerra A., Bohannon B.J., Casamayor E.O. Exploration of community traits as ecological markers in microbial metagenomes // *Mol. Ecol.* 2012. V. 21. No. 8. P. 1909–1917.

29. Zhou Q., Zhang J., Fu J., Shi J., Jiang G. Biomonitoring: an appealing tool for assessment of metal pollution in the aquatic ecosystem // *Analytica Chimica Acta.* 2008. V. 606. No. 2. P. 135–150.

30. Hamza-Chaffai A. Usefulness of bioindicators and biomarkers in pollution biomonitoring // *Int. J. of Biotechnol. for Wellness Industries.* 2014. No. 3. P. 19–26.

31. Parmar T.K.D., Rawtani Y., Agrawal K. Bioindicators: the natural indicator of environmental pollution // *Frontiers in Life Science.* 2016. V. 9. No. 2. P. 110–118.

## References

1. Corda A.F., Bartkowski B., Beckmann M., Dittrich A., Hermans-Neuman K., Lienhoop N., Locher-Krause K., Priess J., Schröter-Schlaack C., Schwarzaf N., Seppeltad R., Straucha M., Václavík T., Volka M. Towards systematic analyses of ecosystem service trade-offs and synergies: Main concepts, methods and the road ahead // *Ecosystem Services.* 2017. V. 28. P. 264–272.

2. Ye X., Chu J., Zhuang Y., Zhang S. Multi-scale methodology: a key to deciphering systems biology // *Frontiers in Bioscience.* 2005. V. 10. P. 961–965.

3. Wierling C., Herwig R., Lehrach H. Resources, standards and tools for systems biology // *Briefings in functional genomics & proteomics.* 2007. V. 6. No. 3. P. 240–251. doi: 10.1093/bfpg/elm027

4. Liu E.T. Systems biology, integrative biology, predictive biology // *Cell.* 2005. V. 121. No. 4. P. 505–506. doi: 10.1016/j.cell.2005.04.021

5. Sumampouw O.J., Risjani Y. Bacteria as indicators of environmental pollution: review // *Int. J. of Ecosystem.* 2014. V. 4 (6). P. 251–258. doi: 10.5923/j.ije.20140406.03.

6. Caruso G. Microbes and their use as indicators of pollution // *J. of Pollution Effects and Control*. 2013. V. 4. P. 1. doi: 10.4172/2375-4397.1000e102.
7. Vogrinc D., Vodovnik M., Marinsek-Logar R. Microbial biosensors for environmental monitoring // *Acta agriculturae Slovenica*. 2015. V. 106/2. P. 67–75. <https://doi.org/10.1080/87559129.2011.563393>
8. Mushunina A.S., Azarova S.V., Yazikov E.G., Parygina I.A. Biotesting of modeled drilling mud as an indicator of environmental risk // *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2016. V. 43 (1). Article number: 43/1/012047 doi: 10.1088/1755-1315/43/1/012047.
9. Dudchik N.V., Drozdova E.V., Sychik S.I. Alternative biological test models for risk assessment of environmental factors. Minsk: Transtechnika, 2015. 194 p. (in Russian).
10. Drozdova E.V., Dudchik N.V., Sychik S.I., Shevlyakov V.V. Integrated toxicity assessment of environmental factors and objects using alternative biological test models: methodology and technology. Minsk: Transtechnika, 2017. 216 p. (in Russian).
11. Dudchik N.V., Shevlyakov V.V. Prokaryotic test-models for the assessment of biological action and hygienic regulation of environmental factors // *Modern methodological problems of studying, assessing and regulating environmental factors that affect human health. Sbornik materialov mezhdunarodnogo foruma*, 2016. V. 1. P. 167–189 (in Russian).
12. Gusev M.V. Humanitarian biology: terminol. dictionary (thesaurus). Moskva: Izdatelstvo Moskovskogo Universiteta, 2009. 363 p. (in Russian).
13. Kirovskaya T.A., Oleskin A.V. Population-communicative paradigm in domestic microbiology [Internet resource] <http://www.sevin.ru/fundecology/biopolitics/biopol1.html> (Accessed: 01.07.2018) (in Russian).
14. Artamonova V.S., Androkanov V.A., Sokolov D.A., Lyutykh I.V., Bulgakova V.V., Bortnikova S.B., Vodoleev A.S. Ecological-physiological diversity of microbial communities in the anthropogenically impacted landscapes of Kuzbass // *Contemporary Problems of Ecology*. 2011. V. 4. No. 5. P. 540–549. doi: 10.1134/S1995425511050158.
15. Taheri-Araghi S., Bradde S., Sauls J.T., Hill N.S., Levin P.A., Paulsson J., Vergassola M., Jun S. Cell-size control and homeostasis in bacteria // *Curr. Biol*. 2017. V. 27. No. 9. P. 1392. doi: 10.1016/j.cub.2017.04.028.
16. Spiesser T.W., Muller C., Schreiber G., Krantz M., Klipp E. Size homeostasis can be intrinsic to growing cell populations and explained without size sensing or signaling // *FEBS J*. 2012. V. 279. No. 22. P. 4213–4230. doi: 10.1111/febs.12014.
17. Dudchik N.V. Study of the properties of a consortium of soil microorganisms as test objects for assessing the integral toxicity // *Gigiena i sanitaria*. 2012. No. 5. P. 82–84 (in Russian).
18. Yin H., Niu J., Ren Y., Cong J., Zhang X., Fan F., Xiao Y., Zhang X., Deng J., Xie M., he Z., Zhou J., Liang Y., Liu X. An integrated insight into the response of sedimentary microbial communities to heavy metal contamination // *Scientific Reports*. 2015. V. 5. Article number: 14266. <https://doi.org/10.1038/srep14266>.
19. Zhang Y., Cong J., Lu H., Yang C., Yang Y., Zhou J., Li D. An integrated study to analyze soil microbial community structure and metabolic potential in two forest types // *PLoS One*. 2014. V. 9. No. 4. P. e93773. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0093773>
20. Li X., Meng D., Li J., Yin H., Liu H., Liu X., Cheng C., Xiao Y., Liu Z., Yan M. Response of soil microbial communities and microbial interactions to long-term heavy metal contamination // *Environ. Pollut*. 2017. Pt. 1. P. 908–917. doi: 10.1016/j.envpol.2017.08.057.
21. Faust K., Raes J. Microbial interactions: from networks to models // *Nature Rev. Microbiology*. 2012. V. 10. No. 8. P. 538–550.
22. Zhu J., Zhang J., Li Q., Han T., Xie J., Hu Y., Chai L. Phylogenetic analysis of bacterial community composition in sediment contaminated with multiple heavy metals from the Xiangjiang River in China // *Mar. Poll. Bull*. 2013. V. 70. No. 1–2. P. 134–139. doi: 10.1016/j.marpolbul.2013.02.023.
23. Liu J., Chen X., Shu H.Y., Lin X.R., Zhou Q.X., Bramryd T., Shu W.S., Huang L.N. Microbial community structure and function in sediments from e-waste contaminated rivers at Guiyu area of China // *Environ Pollut*. 2018. V. 235. P. 171–179. doi: 10.1016/j.envpol.2017.12.008.
24. Bottos E.M., Vincent W.F., Greer C.W., Whyte L.G. Prokaryotic diversity of arctic ice shelf microbial mats // *Environ. Microbiol*. 2008. V. 10. No. 4. P. 950–966. doi: 10.1111/j.1462-2920.2007.01516.x.
25. Dudchik N.V., Sychik S.I., Emeliyanova O.A. Test model for the assessment of cumulative toxicity of soil contaminated with salts of zinc // *Izvestija Natsionalnoi Akademii Nauk Belarusi. Seria biologicheskikh nauk*. 2017. No. 4. P. 53–57 (in Russian).
26. Dudchik N.V., Scherbinskaya I.P., Treilib V.V., Janetskaya S.A., Budkina E.A., Schedikova O.E. Evaluation of cytotoxic action of lead salts using enzyme test-systems // *Zdravookhraneniye*. 2010. No. 11. P. 45–48 (in Russian).
27. Gruzina V.D. Communicative signals of bacteria // *Antibiotiki i khimioterapiya*. 2003. V. 48. No. 10. P. 32–39 (in Russian).
28. Barberan A., Fernandez-Guerra A., Bohannan B.J., Casamayor E.O. Exploration of community traits as ecological markers in microbial metagenomes // *Mol. Ecol*. 2012. V. 21. No. 8. P. 1909–1917. doi: 10.1111/j.1365-294x.2011.05383.x.
29. Zhou Q., Zhang J., Fu J., Shi J., Jiang G. Biomonitoring: an appealing tool for assessment of metal pollution in the aquatic ecosystem // *Analytica Chimica Acta*. 2008. V. 606. No. 2. P. 135–150. doi: 10.1016/j.aca.2007.11.018.
30. Hamza-Chaffai A. Usefulness of bioindicators and biomarkers in pollution biomonitoring // *Int. J. of Biotechnol. for Wellness Industries*. 2014. No. 3. P. 19–26. doi: <http://dx.doi.org/10.6000/1927-3037.2014.03.014>.
31. Parmar T.K.D., Rawtani Y., Agrawal K. Bioindicators: the natural indicator of environmental pollution // *Frontiers in Life Science*. 2016. V. 9. No. 2. P. 110–118. <https://doi.org/10.1080/21553769.2016.1162753>

**Impact of forest fire on soil properties (review)**© 2018. A. A. Dymov<sup>1,2</sup> ORCID: 0000-0002-1284-082X, E. V. Abakumov<sup>3</sup> ORCID: 0000-0002-5248-9018,I. N. Bezkorovaynaya<sup>4</sup> ORCID: 0000-0002-6307-2381, A. S. Prokushkin<sup>5</sup> ORCID: 0000-0001-8721-2142,Ya. V. Kuzyakov<sup>6</sup> ORCID: 0000-0002-9863-8461, E. Yu. Milanovsky<sup>7,8</sup> ORCID: 0000-0001-5621-6845,<sup>1</sup>Institute of Biology of the Komi Science Centre of the Ural Branch of RAS,  
28, Kommunisticheskaya St., Syktyvkar, Russia, 167982,<sup>2</sup>Piritim Sorokin Syktyvkar State University,  
55, Oktyabrskiy Prospekt, Syktyvkar, Russia, 167000,<sup>3</sup>St. Petersburg State University, Department of Applied Ecology,  
29, 16th Line, St. Petersburg, Russia, 199178,<sup>4</sup>Siberian Federal University,  
79/10, Svobodny St., Krasnoyarsk, Russia, 660044,<sup>5</sup>Sukachev Institute of Forest Siberian Branch of RAS,  
50/28, Akademgorodok, Krasnoyarsk, Russia, 660036,<sup>6</sup>Department of Soil Science of Temperate Ecosystems, Georg-August-Universität Göttingen,  
1, Wilhelmsplats, Göttingen, Germany, 37077,<sup>7</sup>Lomonosov Moscow State University,  
1, Leninskie Gory, Moscow, Russia, 119991,<sup>8</sup>Dokuchaev Soil Science Institute,  
7, Pyzhevskiy Pereulok, Moscow, Russia, 119017,

e-mail: aadymov@gmail.com

We examined changes in the morphological, physicochemical properties and features of the organic matter of forest soils impacted by wildfires on the territory of Russia. Morphological signs of pyrogenesis (pyrogenic horizon formation, partial charring of litter and illuviation of organic compounds) are most evident detected in the first decade after a fire. Ground fires in lichen pine forests, formed on Albic Podzols lead to complete burning of litter. Low intensity ground fires in sphagnum pine forests, developing on Histic Podzols, contribute to partial burning of litter (charring). Fires change the hydrothermal regime of soils, which is most clearly demonstrated for soils formed on permafrost soils / cryosols. Fires lead to hydrophobization of the upper mineral horizons, estimated from the contact angle of wetting. Resistant products of pyrogenesis (charcoals, soot) are retained in soils for several centuries. The most common changes in the physical and chemical properties of soils after fires are a decrease in acidity by 1–2 units of pH, an increase of saturation with base saturation. Fires increase aromaticity of soil organic matter. After fires, the content of polyaromatic hydrocarbons in soils increases, and the concentrations of water-soluble organic compounds decrease. Restoration of soil properties to the prefire state takes a decade to several centuries. The introduction of a universal subtype “pyrogenic” is proposed in describing the morphological characteristics of forest soils.

**Keywords:** fires, forest soils, soil organic matter, secondary successions, black carbon.

УДК 631.445.2:631.417:630\*231

**Влияние лесных пожаров на свойства почв  
(обзор литературы)**© 2018. А. А. Дымов<sup>1,2</sup>, д. б. н., в. н. с., доцент,Е. В. Абакумов<sup>3</sup>, д. б. н., профессор, зав. кафедрой,И. Н. Безкоровойнай<sup>4</sup>, д. б. н., профессор, зав. кафедрой,А. С. Прокушкин<sup>5</sup>, к. б. н., зав. лабораторией,Я. В. Кузяков<sup>6</sup>, доктор наук, профессор, зав. отделом,Е. Ю. Милановский<sup>7,8</sup>, д. б. н., гл. н. с., доцент,<sup>1</sup>Институт биологии Коми научного центра Уральского отделения РАН,  
167982, Россия, г. СЫКТЫВКАР, ул. Коммунистическая, 28,

<sup>2</sup> Сыктывкарский государственный университет имени П. Сорокина, 167000, Россия, г. Сыктывкар, Октябрьский проспект, 55,

<sup>3</sup> Санкт-Петербургский государственный университет, 199178, Россия, г. Санкт-Петербург, 16-я линия, 29,

<sup>4</sup> Сибирский федеральный университет, 660041, Россия, г. Красноярск, пр. Свободный, 79/10,

<sup>5</sup> Институт леса им. В. Н. Сукачева СО РАН, 660036, Россия, г. Красноярск, Академгородок № 50, стр. 28,

<sup>6</sup> Гёттингенский университет имени Георга-Августа, 37077, Германия, г. Гёттинген, пл. Вильгельмплац, 1,

<sup>7</sup> Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова, 119991, Россия, г. Москва, Ленинские горы, 1,

<sup>8</sup> Почвенный институт им. В. В. Докучаева, 119017, Россия, Москва, Пыжевский пер., 7, стр. 2,

e-mail: aadymov@gmail.com

Морфологические признаки влияния пирогенеза (формирование пирогенного горизонта, частичное обугливание подстилок и иллюирование органических соединений) наиболее чётко проявляются в первое десятилетие после пожара. Устойчивые к разложению продукты пирогенеза (угли, сажа) сохраняются в почвах до нескольких столетий. Наиболее общими изменениями физико-химических свойств почв после пожаров являются снижение кислотности на 1–2 ед. рН, возрастание степени насыщенности основаниями, увеличение гидрофобности поверхности минеральных горизонтов почв. Пожары приводят к увеличению ароматических структур в составе почвенного органического вещества. После пожаров увеличивается содержание полиароматических углеводов в почвах, уменьшаются концентрации водорастворимых органических соединений. Для восстановления близких к исходным свойствам почв после пожара необходимо от десятилетия до нескольких столетий.

**Ключевые слова:** пожары, лесные почвы, почвенное органическое вещество, вторичные сукцессии, чёрный углерод.

Forest fires are a natural factor of the ecosystem development [1]. Russia as well as the USA, Canada, Portugal, Spain and Australia, are among the countries, which forests are regularly exposed to fires [2, 3]. Forest fires affect ecosystems in a holistic manner. They can have both positive (on individual tree species) and negative effects (e. g., contribute to significant ecosystem degradation) [4]. Warm season climate conditions are the major factors in the frequency and an area of forest fires (Fig. 1). The pyrogenic factor and the climate control the age and mosaic structure of the plant cover, its development, flows of matter and energy [5–7]. The fires frequency in boreal forests of the European Russia varies from 1–2 per century to 1–2 per Millennium [8], and the average interval between fires in Siberia forests is estimated at 50 years [9]. Forest fires dominate in the middle and southern taiga, forest-steppe, but in some hot years the areas of fires can spread to the North – to the northern taiga, forest-tundra and tundra. The accumulation of significant reserves of combustible materials on the soil surface in such ecosystems (including those formed on permafrost) causes a high natural fire hazard of these territories [10, 11].

There has been an increase in various anthropogenic pressures on forest ecosystems in previous decades, as well as an increase in the frequency and area of fire-affected forests. The fires' number increases due to climate changes – “heat waves”, which leads to droughts. In addition, fires of anthropogenic nature were an integral part of slash farming and affected large areas of the taiga [12, 13]. As a result, the vast majority of modern forest landscapes of Russia represent different stages of post-fire successions.

Recently, fires have been attributed to one of the leading soil-forming factors [14]. Despite the wide spread of pyrogenesis, in most cases pyrogenic effects are recorded by researchers in the burnt soils and burnt tree stands only within the first post-fire years and are not taken into account in the analysis of the further functioning and development of forests. In this regard, the main aim of this review is to analyze the fires impact on the forest soil. The aim of this work was to characterize disturbances, changes and preservation of post-fire soils morphological characteristics in various forest ecosystems, distributed mainly in Russia; to assess physico-chemical soil properties changes; to identify the

general patterns of changes in different forms and fractions of soil organic matter (SOM).

**Morphological properties of post-pyrogenic soils**

Fires alter the soils morphological organizations. Depending on the fire type, the soil litter can burn out completely, forming a well-defined pyrogenic horizon (Fig. 2A, see color insert), or during running ground fires the soils litter can burn out only partly, forming a thin charred layer on its surface (Fig. 2B, see color insert). The focal distribution of organic horizons burnout of is typical for pine forests formed on semi-hydromorphic soils (Fig. 2B, see color insert). Specifics of cryogenic microrelief (the combination of hummocks and troughs) in Northern taiga larch forests of Central Siberia also lead to uneven burning of the ground cover and soil organic horizon [15, 16]. Experimental burning-out in middle taiga pine forests carried out in Krasnoyarsk region showed that in the first year after a high-intensity fire the litter stocks are reduced by more than 3 times, after a low-intensity – by no more than 1.5 times. The litter density increases due to the upper low-density layers combustion and the appearance of heavier components in the form of coal and ash [9, 17]. Part of the combustion products (soot, water-soluble compounds) under

the conditions of preferential water flow regime can migrate to the illuvial horizons and geochemically linked drainage network [18]. At the same time, the microreliefs can serve as a refuge for relatively rapid restoration of vegetation cover due to the absence or weak impact of fire (waterlogged and/or frozen state of the organic horizon). Strong ground and especially crown fires lead to the complete destruction of forest litter layer and in most cases cause the death of forest stand [19, 20]. In the first months after the fire, the products of partial pyrogenic decomposition of organic residues can move into mineral horizons (Table 1). The production of pyrogenesis products promotes hydrophobization (due to aliphatic and aromatic organic matter) and cementation (due to ash polyvalent cations and the formation of strong organic-mineral linkages with mineral particles) from the upper soil horizons. At the same time, in soils with partial litter burnout the over-consolidation is less pronounced.

The severity and preservation of soil pyrogenic morphological characteristics is determined by the fire type, its intensity and the original forest type and litter horizons dryness. The fires frequency (fire return interval) in the considered forest types is an important factor of pyrogenic effect on soils. The pyrogenic characters preservation in the forest soil profile varies from days to hundreds of years (Table 1). In most cases, pyrogenic features are

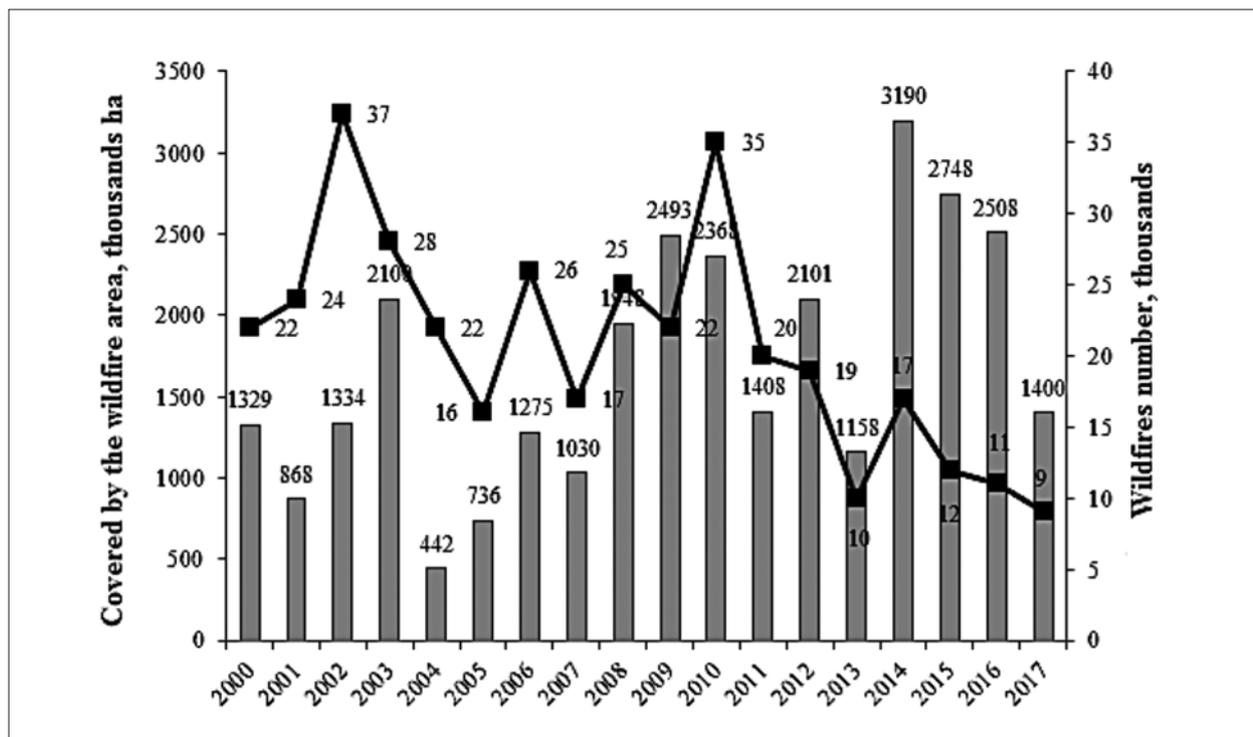


Fig. 1. The statistics of forest fires in Russia, 2000-2017 years. By: [2] with additions from <http://wiki-fire.org>.

Table 1

Examples of morphological characteristics in forest pyrogenic soils						
Time since the moment of exposure	Soil type	Disturbances depth, cm	Litter *	Illusion of pyrogenic organic matter	Upper mineral horizon-sover-consolidation	Carbonaceous inclusions
European North						
Lichen pine forests, middle taiga, ground running fire [24]						
1 year	Albic Podzols (pyrogenic)	up to 10 cm	1	+	+	+
2 years				+	+	+
10 years				-	+	+
16 years				-	+	+
Cowberry-green moss pine forests, middle taiga, ground running fire [25]						
50 days	Albic Podzols (pyrogenic)	up to 2-4 cm	2	+	+	+
83 days				+	+	+
2 years				+	-	+
Bilberry-green moss spruce forests, Northern taiga, ground strong fire [19]						
9 years	Retisols (pyrogenic)	up to 20 cm	2	+	+	+
100 years				+	-	+
154 years				+	-	+
Sphagnum pine forests, Northern taiga, ground running fire [25]						
1 year	Histic Podzols (pyrogenic)	up to 20 cm (foci)	3	+	+	+
3 years				+	+	+
Central Siberia						
Larchforests, Northern taiga, ground running fire [15, 26]						
1 years	Cryozems and podburs (pyrogenic)	up to 20 cm	1	+	+	+
2 years			1	+	+	+
25 years			2	-	-	+
180 years						+
Forest-steppe						
Grass pine forests (insulated pine forests), forest-steppe [27]						
8 years (crowning)	Arenosols (pyrogenic)	up to 20 cm	1	-	+	+
8 years (ground)		up to 20 cm		-	+	+

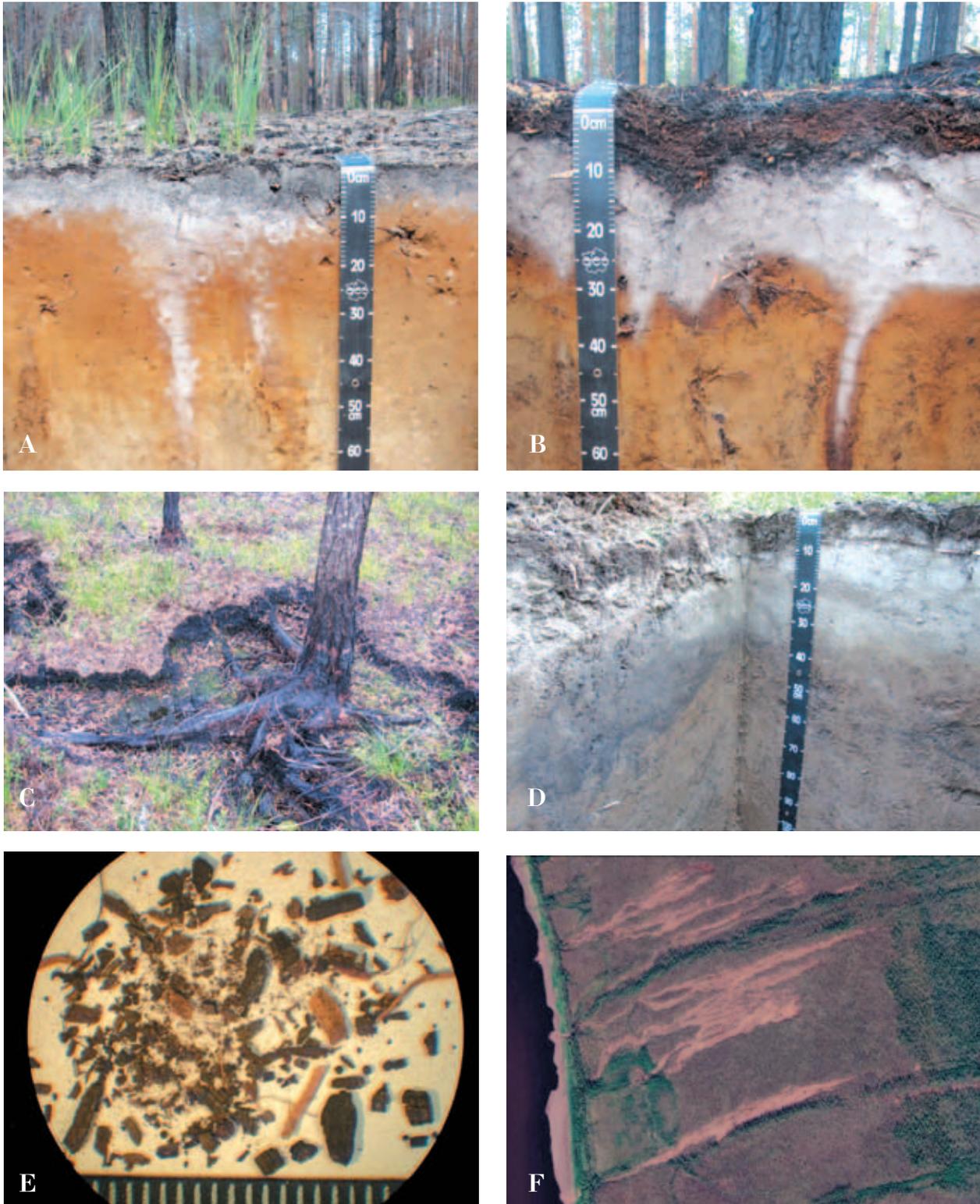
Note: 1 – complete litter combustion; 2 – litter top subhorizons combustion; 3 – litter combustion foci (combustion in all litter’s subhorizons foci). Dash – not detected.

diagnosed by the presence of carbonaceous inclusions at the boundary of forest litter and mineral horizons. Coal inclusions in the old post-pyrogenic successions soils (over 100 years old) are diagnosed in morphones formed by the dumps of the first post-pyrogenic forest stand generation (Fig. 2G, see color insert). In some cases, this may form soils with a polycyclic profile containing several buried pyrogenic horizons [21]. Fires in mountain regions play a special role in soil cover disturbance. The development of post-fire erosion on the slopes increases tens of times [22].

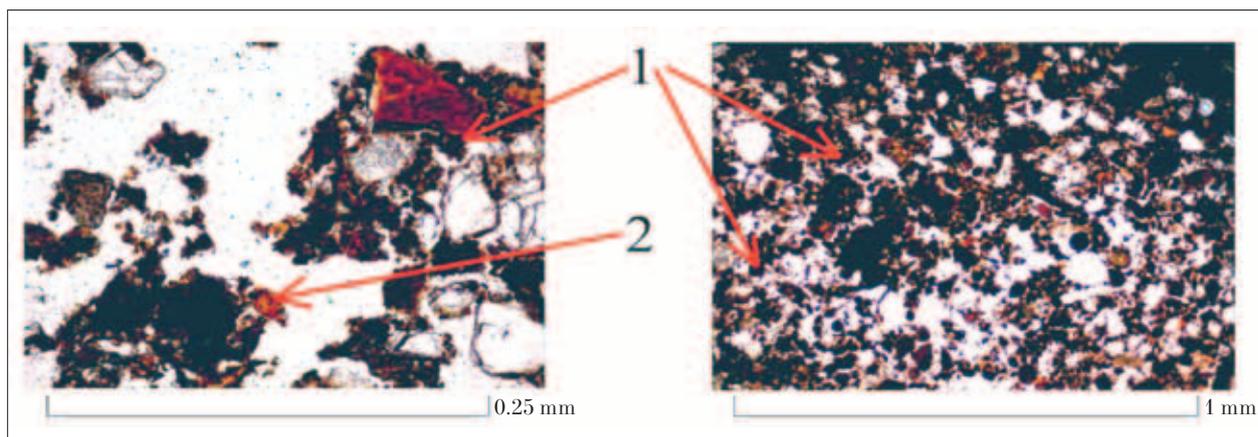
Fire-affected forest areas of the Central Siberian plateau cryolithozone are characterized by development of solifluction process development along river banks (Fig. 2D, see color insert),

which are intensified with increasing precipitation and rapid surface heating in spring [23].

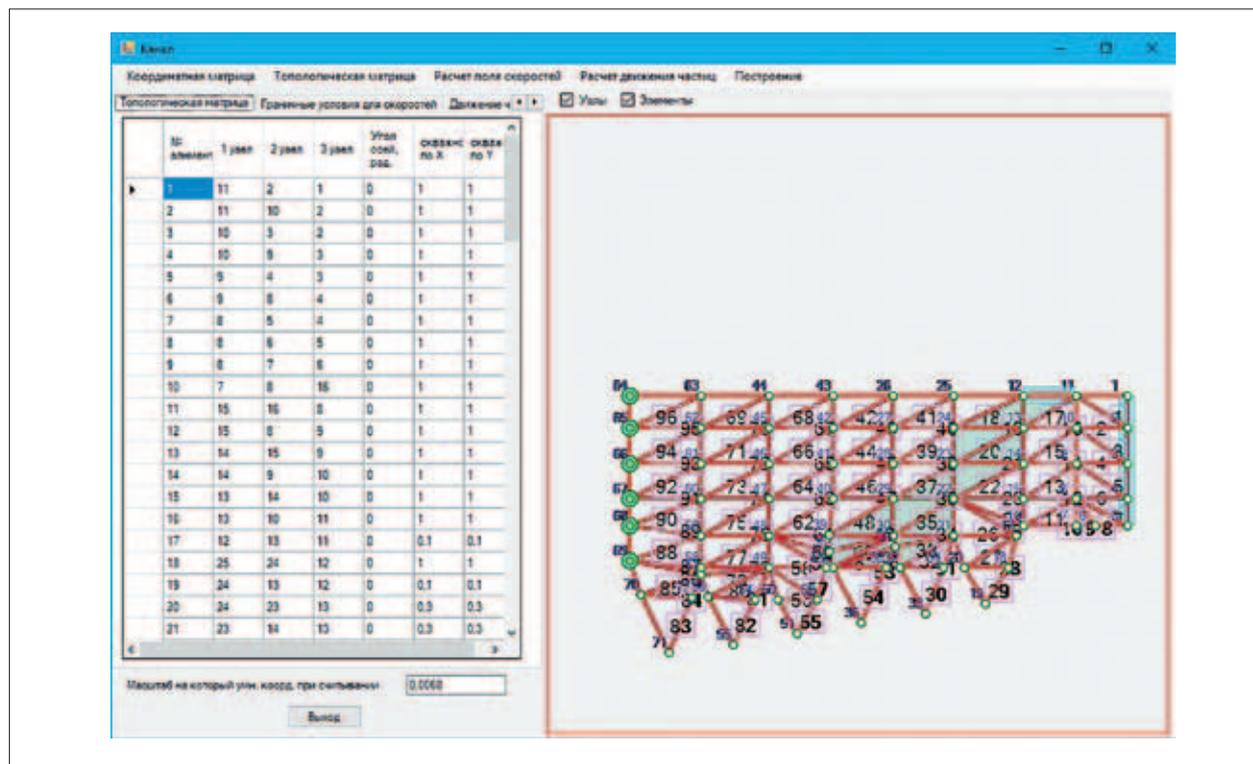
Mesomorphological pyrogenic characteristics are derived from the micro morphology data. The accumulation of Black carbon particles (charcoal), which represent the litter and wood pyrolysis products (Fig. 3, see color insert), as well as the soil pores’ filling with combustion products that reduce the pore space and increase subsequent erosion, was detected. Partly combusted detritus accumulates in the pore space of post-pyrogenic soils (Fig. 3), causing the specificity of accumulation and transformation of organic matter in post-pyrogenic ecosystems [28]. Fires promote the appearance of primary minerals grains fracturing since the temperature



**Fig. 2.** Examples of pyrogenic soil changes. A – pyrogenic Podzol in the lichen pine forest (2 years after the fire); B – pyrogenic Podzol in the cowberry-green moss pine forest (80 days after the fire); C – focal litter burnout in the sphagnum pine forest (a year after the fire); D – pyrogenic buried horizon (left photo) in the Retisols in the green moss spruce forest (about 150 years after the fire); E – charcoal inclusions, separated by 1.6 g/cm<sup>3</sup> of sodium polytungstate solution; F – post-fire solifluction process development, Central Siberia



**Fig. 3.** Microstructure of the upper mineral horizons of postpyrogenic soils in reflected light, where 1 – products of combustion (Black carbon), 2 – particles with unhumified plant residues [29]



**Рис. 2.** Расчётная схема разбиения горизонтального канала пневмосепаратора на конечные элементы  
**Fig. 2.** Design scheme of horizontal channel splitting pneumoseparation into finite elements

on the ground cover surface can reach 1000 °C [9]. Common characteristics of pyrogenic soils microstructure are: signs of the active physical weathering process of primary minerals (quartz, feldspar, especially biotite); the formation of humus persistent forms and coal-like particles (the result of incomplete combustion of plant tissues), as well as the inclusion of plant residues.

Pyrogenesis significantly impacts the intensity changes of the podzol-formation process. Homogenization of the upper mineral horizons occurs due to the slopes' erosion processes development; as a result, burozems (Cambisols) and probably non-podzolic soils with the upper brown mineral horizon may form. The authors of [30] have identified independent groups of pyrogenated and pyrogenic burozems that differ from the undisturbed soils by their morphological and physico-chemical properties. "Temporary" Cryosols transfer to Entic Podzols is possible for soils formed cryolithozone.

Indexation of pyrogenic signs is widely discussed currently. Different designations for pyrogenic horizons are used when describing soils: Pr / pr [31]; pir [21, 30, 32]. Most of the proceedings in the morphological soils description detect only the presence of charcoal without pyrogenic horizons indexation. The Field guide for Russian soils [33]

recommended a small index "pir" only for peat soils. The carbonaceous inclusions presence and pyrogenic signs are discussed in the framework of the World Soil Classification for Soil Resources [34] and the Canadian Soil Classification System [35]. The most informative one should recognize using of a small index "pyr" (from pyrogenic), as it is convenient for the universality of the features translation into the WRB system [36]. Small index "pyr" should be used in the presence of coal and other pyrogenesis products in individual genetic horizons with subsequent allocation of a universal subtype of soils.

### Chemical and physical properties of post-pyrogenic soils

Post-pyrogenic soils differ from natural ones in a number of physicochemical properties. The upper horizons of post-pyrogenic soils in lichen pine forests [24] and cowberry – green moss pine forests [37] are characterized by an acidity decrease (Fig. 4) and an increase in the degree of base saturation in comparison with conditionally mature soils. The similar patterns have been established for post-pyrogenic Podzols of spruce forests [19]. In some cases, a high intensity of fire altered soil acidity greatly [38]. Post-fire acidity reduction in the forest soils organogenic horizons is also typical for the Kola Peninsula soils [39]. The similar

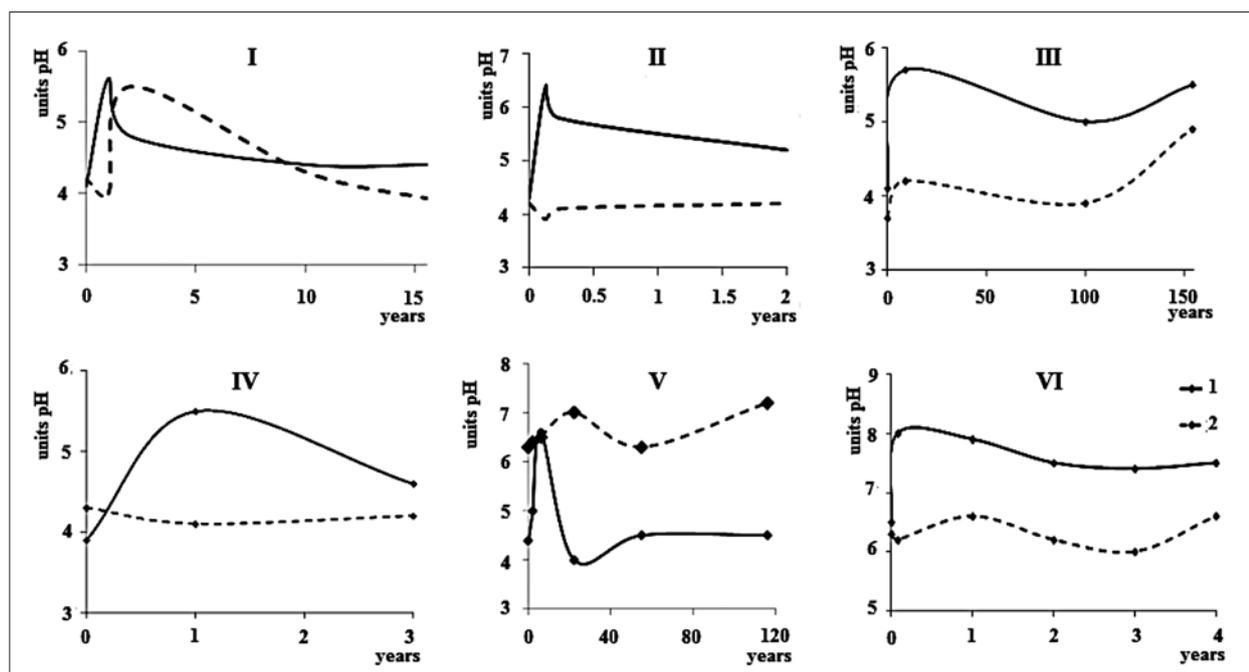


Fig. 4. Acidity changes in the upper genetic soil horizons of lichen pine forests (I), cowberry – green moss pine forests (II), bilberry spruce forests (III), sphagnum pine forests, Komi Republic (IV), green moss larch forests, Krasnoyarsk Region (V) and grassy pine forests, forest-steppe, Samara region, ground fire (VI). 1 – The upper organogenic horizon, 2 – the upper mineral horizon. Zero along the abscissa corresponds to the background plot

changes in soil physicochemical properties have been established for semi-hydromorphic landscapes of Siberia and the European North [25, 26]. The reduction of all forms of acidity in the organic horizons, as well as low increase in the amount of exchange bases and saturation degree of the soil absorption complex is detected in the sandy Podzols of the middle taiga pine forests of Central Siberia a year after a ground fire [9]. The acidity increase in mineral horizons occurs immediately after the fire (Fig. 4II). Soil profile inflow of ash elements and coal after the fire [40] has a significant impact on acidic soils neutralization. In accordance with [31], the litter alkalization may occur due to coal formed, since a part of the low-molecular organic compounds present in soil solutions of ashes can be sorbed on its surface. The carbon content increase in the upper mineral horizons activates the illuviation of oxalate-extractable iron and aluminum [24, 26]. Thus, postpyrogenic changes in acidity, exchange bases and oxalate-extractable iron and aluminum, have been detected in most studies.

Nitrogen inflow into the upper mineral horizons of the Entic Podzols was detected in the larch forests of Central Evenkia in the initial years after strong ground fire with complete destruction of the forest stand. This is of particular importance for cryogenic ecosystems since nitrogen is one

of the factors that limit their productivity [41]. The combustion of live ground cover and litter leads to the dieback of a significant part of the root material and to an increase in organic matter in the upper mineral soil layer [42, 43]. An alteration in nitrogen fraction composition was detected – an increase in the easy hydrolysable fractions by 1.5–2 times. Mineralization processes are activated primarily in organogenic horizons – the total nitrogen content passing into the mineral form increases by 32%. The nitrogen content and its fraction ratio approach the pre-fire conditions on older burnt-out forests (over 12 years). Nitrogen compounds are sensitive to pyrogenic effects. The Podzols of middle-taiga pine forests of Central Siberia in the initial years after a ground fire are characterized by an increase in total nitrogen by 1.5 times in the litter and by 3–5 times in the mineral soil layer (0–20 cm) [44]. These alterations are due to the very abundant needles' fall in the first post-fire year and its intense mineralization. The concentration of hydrolyzed compounds increases by 1.5–2 times. Mineralization activation and an increase in the proportion of easy hydrolysable nitrogen-containing compounds in the initial post-fire years were previously detected for sod-podzols [32, 45, 46]. Thus, fires increase both the total

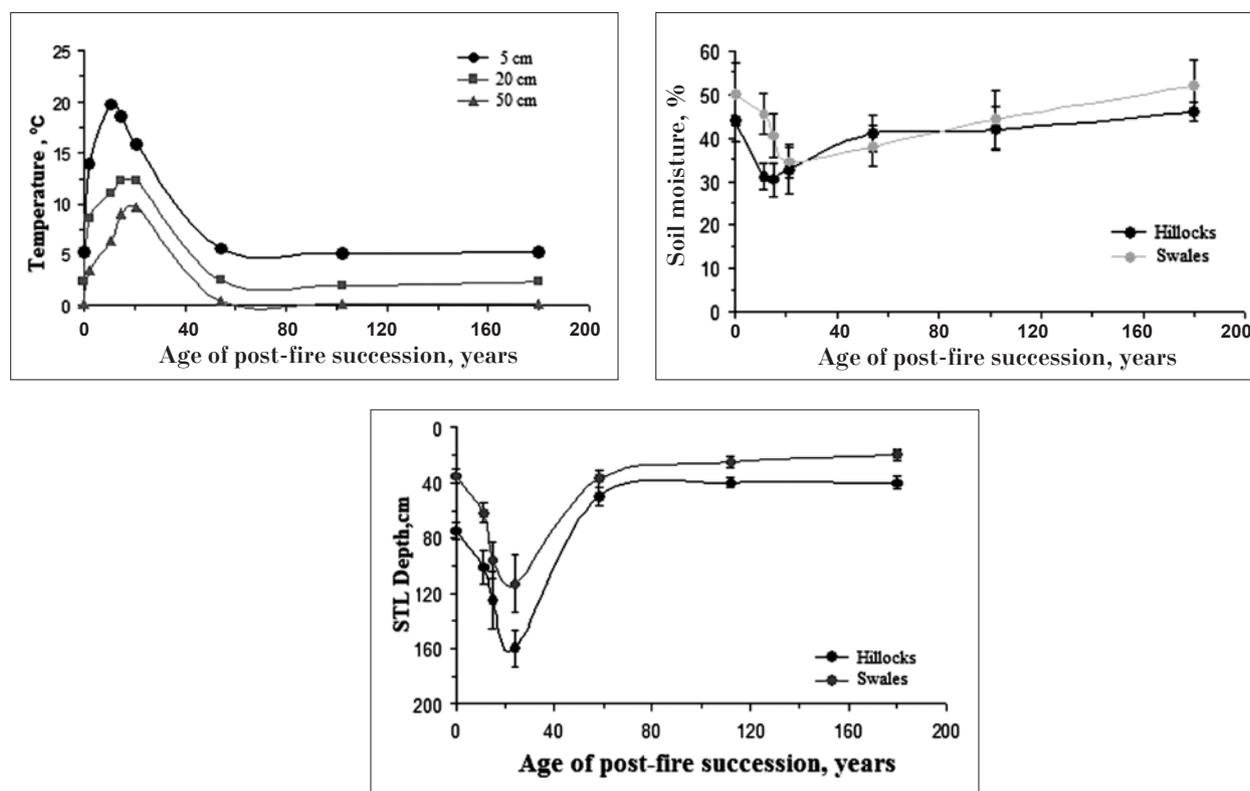


Fig. 5. Changes in temperature, soil moisture and the lactive layer thickness during post-pyrogenic succession, Central Siberia, Evenkia, Krasnoyarsk Region, July 2006 (n = 7, error interval – standard deviation)

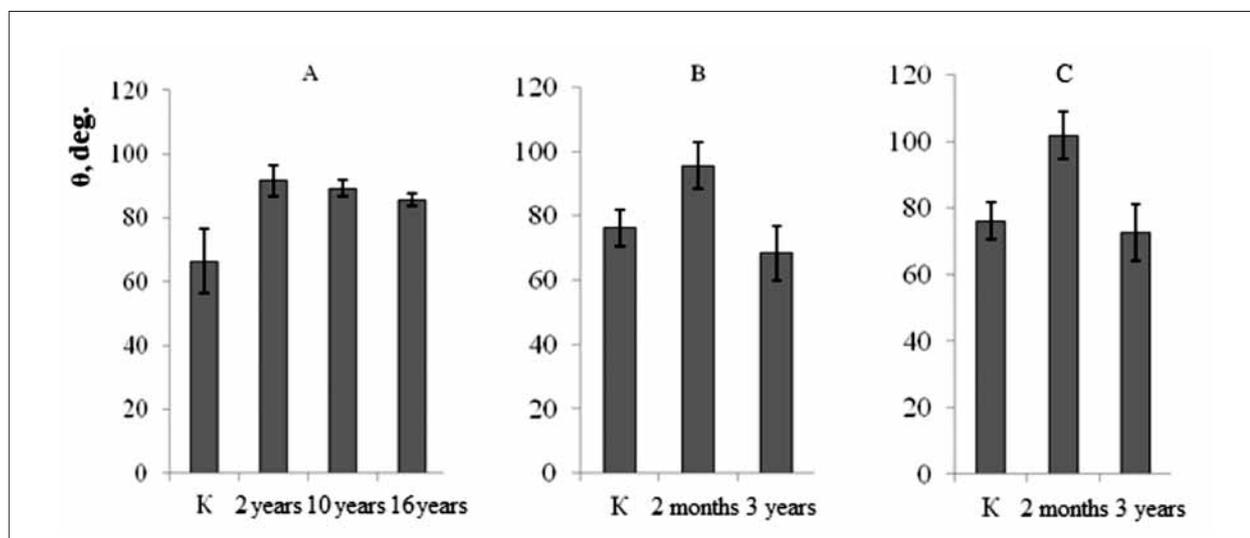


Fig. 6. Hydrophobicity (contact angle) of upper mineral horizons of lichen pine forests soils, middle taiga, Komi Republic (A), soils of grassy pine forests, forest-steppe, Samara region, after ground (B) and crowning fires (C).  
K – conditionally background plot (n = 10), error interval – standard deviation

nitrogen and the concentration of easy hydrolysable nitrogen-containing compounds in the soils.

The assessment of the Podzols hydrothermal properties after controlled ground fires in Siberia [47] showed that the temperature regime of burnt places becomes more contrasting in comparison with the original forest. The litter mineralization rate may be observed in the initial post-fire years. The most obvious changes in the hydrothermal regime are observed on the example of soils with a close permafrost underlying (Fig. 5). The increase in average annual temperatures and the improvement of the hydrological regime (caused by the removal of the thermal insulating litter's layer) accelerate soils mineralization process; that provides the improvement of the nutritional regime of larch seedlings and dwarf shrubs rapid growth.

In most cases, low-intensity fires do not affect the texture of the upper mineral horizons [37], but a short-term activation of the cementation processes and aggregates' "cohesion" can be expected [48].

There is an increase in the value of the contact angle (CA) of the upper mineral horizons in most of the studied post-pyrogenic soils (Fig. 6), that indicates their surface hydrophobization in comparison with eluvial horizons of soils of background plots [49]. In soils exposed to fire, the densitometric fractions of free and occluded organic matter proved to be the most hydrophobic [25]. The increased CA values of pyrogenic soils solid phase approach the values of background soils and shift towards hydrophilicity ten years after the fire.

In the course of post-pyrogenic successions the basic physicochemical properties approach the

properties of background landscapes' soils already ten years after the fire, but even after a hundred years or more they differ from the original. Forest fires significantly alter the hydrothermal and physical properties of topsoil horizons, increasing hydrophobicity, and thereby contributing to an increase in surface runoff in fire-affected forests.

### The carbon content and fractional distribution of its compounds in post-pyrogenic soils

Pyrogenic carbon is considered as one of the most stable pools of carbon sequestration from the atmosphere. According to various estimates [50–52], its contribution varies from 1.6 to 60% of the total soils organic carbon content. Pyrogenic carbon (PyC) or Black carbon is highly resistant and can persist in soils and sediments for a long time. Based to the results of model experiments, the decomposition period of PyC varies from decades [53] to several thousand years [54]. A significant quantities of PyC are concentrated in peat soils [55].

Various pools and fractions within the SOM change differently during pyrogenic exposure. An increase in total carbon content in the upper mineral horizons may occur during the initial post-fire months [37], but in a few years it is usually leveled in conditions of percolation regime of soils. Pyrogenic horizons formed on the mineral and organogenic horizons boundary are enriched with pyrogenic carbon, which is well separated in the light fractions composition during densi-

metric fractionation (Fig. 2G). An increase in the total content of both humic and fulvic acids with an increase in the fire intensity was detected in pyrogenic burozems (Cambisols) [30].

One of the most sensitive parameters to the pyrogenic effect is the saturation of organic matter with nitrogen. A significant decrease in the C : N ratio (up to 20 units) in pyrogenic horizons of all investigated pyrogenic soils is observed. Subsequently, the C : N ratio gradually increases to the values of background soils during the post-pyrogenic succession. The general pattern of fires after-effects on the carbon balance is the redistribution of carbon stocks between the litter and the upper mineral horizons. In the European North and Siberia soils the litter's carbon stocks decrease with ground high-intensity fires, while no significant alterations in soil carbon stocks occur with ground running fires.

Polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) perform the diagnostic function of the pyrogenesis effect on soils [24, 37, 57]. A 2–9-fold increase in the total PAHs content in post-pyrogenic soils of the European North is observed, which is mainly due to the accumulation (formation) of light di- and tri-nuclear PAHs. The most water-soluble PAHs can migrate with vertical and lateral streams to geochemically subordinate landscapes and watercourses [49]. Significant accumulation of PAHs in light texture soils of insulated pine forests of the forest steppe was not detected, probably as a result of their intensive migration with clay fraction to accumulative positions. PAH accumulation in the soil after a crowning fire is weaker than after the ground fire. The total PAH concentrations of the upper soils' horizons in the forest-steppe post-pyrogenic soils range from 16 to 24 ng/g [49]. The increase in soils' PAH content is determined by the combustion temperature and the composition of the combusted matter. According to [58], the greatest PAH amount is formed at temperatures of 200–400 °C, which are more typical for running ground fires in the taiga zone [59]. The PAH production is less observed at higher temperatures, that are more typical to crowning and ground independent fires.

Benzenepolycarboxylic acids (BPCA) in the pyrogenic organic matter may serve as markers of pyrogenic effects. Qualitative analysis of the combustion products as BPCA shows their increase in pyrogenic material [60, 61]. Aliphatic and low-molecular compounds are the most mobile, capable of migration. It was detected [62], that the most important

biomarkers are an unhydrosugars – products of low-temperature combustion, used to diagnose the fire effects in rivers.

Common patterns in the soils of burned forests consists of a sharp decrease in the water-soluble organic compounds (WSOC) carbon content in the first post-fire months, and the gradual restoration of their concentrations over time. The greatest changes occur in pyrogenic horizons – the WSOC carbon content decreases by 3 to 27 times depending on the phytocenosis, the fire type and the post-fire time [63]. The litter sub horizons not directly exposed to fire retain the WSOC concentrations close to the conditionally background soils.

In accordance with [64], the restoration of the dissolved organic carbon initial concentrations in water streams and its spectral properties is observed approximately after 60 years after the pyrogenic effect. Post-pyrogenic increase in the WSOC carbon content in the cryolithozone is associated with the rise of permafrost water impermeable horizon [65, 66]. This is due to the restoration of vegetation and soil surface organic horizon accumulation, which are the main sources of WSOC.

Changes in the molecular composition of the SOM composition were detected using <sup>13</sup>C NMR spectroscopy. An increase in the proportion of free organic matter aromatic structures in the post-pyrogenic soils is the common pattern.

The fire effect on the humic acids molecular fragments of the forest-steppe gray-humus soils consists in increasing their aromatization degree and decreasing oxygen containing functional groups [67]. Pyrogenesis causes a significant transformation of SOM [68, 69], its stability and the individual molecular fragments content. The fire-factor should be taken into account when identifying the specific properties of fractions and groups of soils' organic compounds. At the same time, compounds with a predominance of aromatic fragments accumulate in soils, and with aliphatic ones migrate to river network. Thus, there is a separation of the elements and substances cycles between individual parts of the same landscape or subordinate landscapes.

Fires significantly transform SOM of boreal forests. Plant residues, litter and organic horizons partial combustion increases aromaticity in pyrogenic organic matter, PAHs and BPCA concentrations and reduces the WSOC content. Thus, fires can significantly effect on the formation and functioning of various fractions and groups of SOM.

**Conclusion**

The fires influence on the forest soils properties has a number of common patterns. Fires determine morphological soil properties (formation of pyrogenic horizons, litter carbonization, pyrogenesis products illuviation, charcoal, coal presence). Pyrogenic soils are characterized by lower acidity, greater saturation of the soil's absorbing complex with exchange bases, surface hydrophobization of the upper mineral horizons. Hydrothermal regime changes and sand available nutrients increase in post-fire soils. Pyrogenic soils are enriched with aromatic polycyclic hydrocarbons. The water-soluble organic compounds content decreases and the aromatic components content increases in the SOM and its individual fractions in post-pyrogenic soils.

Pyrogenic morphological and analytical features are preserved in soils' pyrogenic morphological and analytical signs persist for tens and hundreds of years and reflect the contemporary soils evolution and the specific parameters of SOM. It may be necessary to introduce a universal soil subtype – “pyrogenic” (“pyr”) in the presence of pyrogenic characteristics in the soil profile.

*The work was supported by the grant of the President of the Russian Federation for state support of young Russian scientists–PhD MK – 2905.2015.4, by the grant SPbSU “Urban ecosystems of the Arctic zone of the Russian Federation: dynamics, status and sustainable development”, as well as RFBR projects (№ 16-04-00796 and № 18-05-60203\_arctic).*

*The great awcnoledgments are made to Ekaterina Maksimova for their held in field and laboratory works.*

**References**

1. Doerr S.H., Santin C. Global trends in wildfire and its impacts: perceptions versus realities in a changing world // Phil. Trans. R. Soc. B. 2016. V. 371. P. 1–10. <http://dx.doi.org/10.1098/rstb.2015.0345>.

2. Global forest resources assessment. 2015. FAO. Rome. 2015. 244 p.

3. San-Miguel-Ayanz J., Durrant T., Boca R., Liberta G., Branco A., de Rigo D., Ferrari D., Maianti P., Arts Vivancos T., Schulte E., Loffler P. Forest fires in Europe, Middle East and North Africa 2016. Luxembourg, 2017. 126 p. doi: 10.2760/17690.

4. Sannikov S.N. The role of fire in the formation of forest soils // Russian Journal of Ecology. 1976. No. 1. P. 42–46 (in Russian).

5. Abaimov A.P., Zyryanova O.A., Prokushkin S.G., Koike T., Matsuura Y. Forest Ecosystems of the cryolithic zone of Siberia; regional features, mechanisms of stability and pyrogenic changes // Eurasian J. For. Res. 2000. V. 1. P. 1–10.

6. Fultz L.M., Moore-Kucera J., Dathe, J., Davinic M., Perry G., Wester D., Schwilk D.W., Rideout-Hanzak S. Forest wildfire and grassland prescribed fire effects on soil biogeochemical processes and microbial communities: Two case studies in the semi-arid Southwest // Applied Soil Ecology. 2016. V. 99. P. 118–128.

7. Ponomarev E.I., Kharuk V.I. Wildfire occurrence in forests of the Altai-sayan region under current climate changes // Contemporary Problems of Ecology. 2016. V. 9. No. 1. P. 29–36.

8. Gromtsev A. Natural disturbance dynamics in the boreal forest of European Russia: a review // Silva Fennica. 2002. V. 36. P. 41–55.

9. Ivanova G.A., Konard S.G., Makrae D.D. The impact of fires on the components of the ecosystem of middle-taiga pine forests of Siberia. Novosibirsk: Nauka, 2014. 232 p.

10. Kharuk V.I., Dvinskaya M.L., Ranson K.J. The spatiotemporal pattern of fires in northern taiga larch forests of Central Siberia // Russian Journal of Ecology. 2005. V. 36. No. 5. P. 302–311.

11. Sofronov M.A., Volokitina A.V. Wildfire ecology in continuous permafrost zone // Permafrost ecosystems: Siberian larch forest. Series: Ecological Studies. V. 209. New York: Springer, 2009. P. 77–79.

12. Aleynikov A.A., Tyurin A.V., Simakin L.V., Efimenko A.S., Laznikov A.A. Fire history of dark needle coniferous forests in Pechora-Ilych Nature Reserve from the second half of XIX century to present time // Siberian Journal of Forest Science. 2015. V. 6. P. 31–42. doi: 10.15372/SJFS20150603 (in Russian).

13. Dymov A.A., Dubrovskiy Y.A., Startsev V.V. Postagrogenic development of Retisols in the middle taiga subzone of European Russia (Komi Republic) // Land Degradation and Development. 2018. V. 29. P. 495–505. doi: 10.1002/ldr.2881.

14. Certini G. Fire as a soil-forming factor // Ambio. 2014. V. 43. P. 191–195. doi: 10.1007/s13280-013-0418-2.

15. Kawahigashi M., Prokushkin A., Sumida H. Effect of fire on solute release from organic horizons under larch forest in Central Siberian permafrost terrain // Geoderma. 2011. V. 166. P. 171–180. doi: 10.1016/j.geoderma.2011.07.027.

16. Bezkorovaynaya I., Ivanova G., Prokushkin A., Evgrafova S., Klimchenko A., Tarasov P., Solnishkin I. Dynamic of soil properties after forest fires in Boreal ecosystems of Central Siberia (Russia) // Flamma. 2015. No. 6 (2). P. 81–85.

17. Bezkorovainaya I.N., Tarasov P.A., Ivanova G.A., Bogorodskaya A.V., Krasnoshchekova E.N. The nitrogen reserves in sandy podzols after controlled fires in pine

- forests of Central Siberia // Eurasian soil science. 2007. No. 6. P. 700–707.
18. Hockaday W.C., Grannas A.M., Kim S., Hatcher P.G. The transformation and mobility of charcoal in a fire-impacted watershed // *Geochim. Cosmochim. Acta*. 2007. V. 71. P. 3432–3445. doi: 10.1016/j.gca.2007.02.023.
19. Dymov A.A., Dubrovskii Yu.A., Gabov D.N., Zhan-gyrov E.V., Nizovsev N.A. Effects of fire at Spruce forest on soil organic matter (northern taiga of Komi Republic) // *Russian Forest Science*. 2015. V. 1. P. 52–62 (in Russian).
20. Krasnoshchekov Yu.N., Valendik E.N., Bez-korovainaya I.N., Verkhovets S.V., Kisilyakhov E.K., Kuz'michenko V.V. The influence of controlled burning of forests damaged by siberian moth on properties of soddy-podzolic soils in the lower Angara River basin // *Russian Forest Sciences*. 2005. V. 2. P. 16–24 (in Russian).
21. Chevychelov A.P., Shakhmatova E.Y. Postpyro-genic polycyclic soils in the forests of Yakutia and Trans-baikal region // *Eurasian Soil Science*. 2018. V. 51. No. 2. P. 241–250.
22. Benavides-Solorio J., MacDonald L.H. Post-fire runoff and erosion from simulated rainfall on small plots, Colorado Front Range // *Hydrological Processes*. 2001. V. 15. P. 2931–2952. doi:10.1002/hyp.383
23. Kharuk V.I., Shushpanov A.S., Im S.T. Clima-togenic dynamics of solifluction in the permafrost zone of Central Siberia // *Engineering and Technology. En-gineering & Technologies*. 2015. V. 8 (6). P. 744–754 (in Russian).
24. Dymov A.A., Gabov D.N. Pyrogenic alterations of Podzols at the North-East European part of Russia: mor-phology, carbon pools, PAH content // *Geoderma*. 2015. V. 241–242. P. 230–237.
25. Dymov A.A. Soils changes during postcutting, postpyrogenic and postagrogenic forest succession at the North-East of the European part of Russia. *Avtoref. ...doct. nauk*. Moskva. 2018. 48 p. (in Russian).
26. Startsev V.V., Dymov A.A., Prokushkin A.S. Soils of postpyrogenic larch stands in Central Siberia: Morphology, physicochemical properties, and specificity of soil organic matter // *Eurasian Soil Science*, 2017. V. 50. P. 885–897. doi: 16.1134/S1064229317080117.
27. Maksimova E., Abakumov E. Soil organic mat-ter quality and composition in a postfire Scotch pine forest in Tolyatti, Samara region // *Biological Com-munications*. 2017. V. 62 (3). P. 169–180. <https://doi.org/10.21638/11701/spbu03.2017.303>.
28. Maksimova E., Abakumov E. Wildfire effects on ash composition and biological properties of soils in forest–steppe ecosystems of Russia // *Environmental Earth Sciences*. 2015. V. 74. P. 4395–4405. doi: 10.1007/s12665-015-4497-1.
29. Maksimova E., Abakumov E. Micromorphological characteristics of sandy forest soils recently impacted by wildfires in Russia // *Solid Earth*. 2017. V. 8. P. 553–560. doi:10.5194/se-8-553-2017.
30. Pshenichnikov B.F., Pshenichnikova N.F. Genesis and evolution of the Preoceanianburozem. Vladivostok: Iz-datelskiy dom Dalnevostochnogo universiteta, 2002. 292 p. (in Russian).
31. Sapozhnikov A.P., Karpachevsky L.O., Ilyina L.S. Post-fire soil formation in cedar-broad-leaved forests // *Bulletin of Moscow State Forest University. Lesnoy Vest-nik*. 2001. No. 1. P. 132–164 (in Russian).
32. Krasnoshchekov Yu.N. Soils of mountainous forests and their transformation under the impact of fires in baikal region // *Eurasian Soil Science*. 2018. V. 51. No. 4. P. 371–384.
33. Field guide for Russian soils. Moskva: V.V. Do-kuchaev Soil Science Institute, 2008. 182 p.
34. Certini G. Charcoal should receive greater con-sideration in soil classification systems? // *Abstracts 5th International Conference of Fire Effects on Soil Properties*. Dublin, 2015. P. 13.
35. Ponomarenko E., Anderson D., Gregorich E. A recommendation for a new descriptor for pyrogenic soil horizons in the Canadian Soil Classification System // *Abstract of North American Forest Soils Conference-International Symposium on Forest Soils 2018*. Quebec, Canada, 2018. P. 88–89.
36. IUSS Working Group WRB. World reference base for soil resources 2014, update 2015. International soil classification system for naming soils and creating legends for soil maps. *World Soil Resources Reports*. No. 106. Rome: FAO, 2015.
37. Dymov A.A., Dubrovskii Yu.A., Gabov D.N. Py-rogenic changes in iron alluvial podzols in the middle taiga of the Komi Republic // *Eurasian Soil Sci*. 2014. V. 47. P. 47–56. doi: 10.1134/S1064229314020045.
38. Tsibart A.S., Gennadiev A.N. The influence of fires on the properties of forest soils in the Amur River basin (the Norskii Reserve) // *Eurasian Soil Science*. 2008. V. 41. No. 7. P. 686–693.
39. Lukina N.V., Polyanskaya L.M., Orlova M.A. Nu-tritious regime of soils of the north-taiga forests. Moskva: Nauka, 2008. 342 p. (in Russian).
40. Aleksandrovskii A.L. Pyrogenic origin of car-bonates: Evidence from pedoarchaeological investiga-tions // *Eurasian Soil Science*. 2007. V. 40. No. 5. P. 471–477.
41. Prokushkin S.G., Abaimov A.P., Prokushkin A.S., Kaverzina L.N. Nitrogen nutrition of larch stands on per-mafrost soils of Middle Siberia // *Contemporary Problems of Ecology*. 2002. No. 2. P. 203–212 (in Russian).
42. Vedrova E.F., Klimchenko A.V. Dynamics of ecological functions of deciduous forests of northern taiga under the action of fire // *Contemporary Problems of Ecol-ogy*. 2007. V. 14. No. 2. P. 263–273 (in Russian).
43. Bezkorovainaya I.N., Klimchenko A.V. Reserves of mortmass in cryogenic soils after fires // *Soil Resources of Siberia: Challenges of the 21st Century*. Novosibirsk, 2017. P. 10–14 (in Russian).

44. Bezkorovainaya I.N., Borisova I.V., Klimchenko A.V., Shabalina O.M., Zakharchenko L.P., Ilyin A.A., Beskrovny A.K. Influence of the pyrogenic factor on the biological activity of soils under permafrost conditions (Central Evenkia) // *Bulletin of KrasGAU*. 2017. No. 9. P. 181–189.
45. Popova E.P. Nitrogen in forest soils. Novosibirsk: Nauka, 1983. 163 p. (in Russian).
46. Popova E.P. Pyrogenic transformation of soil properties of the Middle Angara region // *Contemporary Problems of Ecology*. 1997. No. 4. P. 413–418 (in Russian).
47. Tarasov P.A., Ivanov V.A., Ivanova G.A., Krasnoshchekova E.N. Postpyrogenic changes in the hydrothermal parameters of soils in middle-taiga pine forests // *Eurasian Soil Science*. 2011. V. 44. P. 731–738.
48. Mataix-Solera J., Cerda A., Arcenequi V., Jordan A., Zavala L.M. Fire effects on soil aggregation: A review // *Earth-Science reviews*. 2011. V. 109. P. 44–60.
49. Maksimova E. Yu., Bykova G.S., Abakumov E.V. The characteristic of physical properties of post fire soils // *Izvestiya of the Samara Scientific Center of the Russian Academy of Sciences*. 2014. No. 5. P. 51–57. (in Russian)
50. Krasilnikov P.V. Stable carbon compounds in soils: their origin and functions // *Eurasian Soil Sci*. 2015. V. 48. P. 997–1008. doi: 10.1134/s1064229315090069.
51. Forbes M.S., Raison R.J., Skjemstad J.O. Formation, transformation and transport of black carbon (charcoal) in terrestrial and aquatic ecosystems // *Sci. Total Environ*. 2006. V. 370. P. 190–206. doi: 10.1016/j.scitotenv.2006.06.007.
52. Reisser M., Purves R.S., Schmidt M.W.I., Abiven S. Pyrogenic carbon in soils: a literature-based inventory and a global estimation of its content in soil organic carbon and stocks // *Front. Earth Sci*. 2016. V. 4. P. 1–14. doi: 10.3389/feart.2016.00080.
53. Singh N., Abiven S., Torn M.S., Schmidt M.W.I. Fire-derived organic carbon in soil turns over on a centennial scale // *Biogeosciences*. 2012. V. 9. P. 2847–2857. doi: 10.5194/bg-9-2847-2012.
54. Kuzyakov Y., Bogomolova I., Glaser B. Biochar stability in soil: Decomposition during eight years and transformation as assessed by compound specific <sup>14</sup>C analysis // *Soil Biology & Biochemistry*. 2014. V. 70. P. 229–236.
55. Leifeld J., Alewell C., Bader C., Krüger J.P., Mueller C.W., Sommer M., Steffens M., Szidat S. Pyrogenic carbon contributes substantially to carbon storage in intact and degraded northern peatlands // *Land Degradation & Development*. 2018. V. 29. P. 2082–2091. doi: 10.1002/ldr.2812.
56. Maksimova E.Yu., Tsi bart A.S., Abakumov E.V. Soil properties in the Tol'yatti pine forest after the 2010 catastrophic wildfires // *Eurasian Soil Science*. 2014. No. 9. P. 940–951. doi: 10.1134/S1064229314090087.
57. Dymov A.A., Gabov D.N., Milanovskii E.Yu. <sup>13</sup>C-NMR, PAHs, WSOC and repellence of fire affected soils (Albic Podzols, Russia) // *Environmental Earth Sciences*. 2017. V. 76. P. 1–10. doi: 10.1007/s12665-017-6600-2.
58. Rey-Salgueiro L., Martínez-Carballo E., Merino A., Vega J.A., Fonturbel M.T., Simal-Gandara J. Polycyclic aromatic hydrocarbons in soil organic horizons depending on the soil burn severity and typo of ecosystem // *Land Degradation & Development*. 2018. V. 29. P. 2112–2123. doi: 10.1002/ldr.2806.
59. Santin C., Doerr S.H., Merino A., Bryant R., Loader N.J. Forest floor chemical transformations in a boreal forest fire and their correlations with temperature and heating duration // *Geoderma*. 2016. V. 264. P. 71–80.
60. Brodowski S., Rodionov A., Haumaier L., Glaser B., Amelung W. Revised black carbon assessment using benzene polycarboxylic acids // *Org. Geochem*. 2005. V. 36. P. 1299–1310.
61. Wiedemeier D.B., Brodowski S., Wiesenberger G.L.B. Pyrogenic molecular markers: Linking PAH with BPCA analysis // *Chemosphere*. 2015. V. 119. P. 432–437.
62. Myers-Pigg A.N., Louchouart P., Amon R.M.W., Prokushkin A., Pierce K., Rubtsov A. Labile pyrogenic dissolved organic carbon in major Siberian Arctic rivers: Implications for wildfire-stream metabolic linkages // *Geophys. Res. Lett*. 2015. V. 42. P. 1–9. doi: 10.1002/2014GL062762.
63. Dymov A.A., Startsev V.V., Zueva O.M. Post-fire dynamics of water-soluble carbon in forest soils (Case Study in the Republic of Komi) // *Russian Forest Sciences*. 2018. No. 5. P. 359–371. doi: 10.1134/S0024114818040058 (in Russian).
64. Parham L.M., Prokushkin A.S., Pokrovsky O.S., Titov S.V., Grekova E., Shirokova L.S., McDowell W.H. Permafrost and fire as regulators of stream chemistry in basins of the Central Siberian Plateau // *Biogeochemistry*. 2013. V. 116. P. 55–68.
65. Bogdanov V.V., Prokushkin A.S., Prokushkin S.G. The ground fire influence on mobility of the soil organic matter in the larch forest of the cryolithozone in middle Siberia // *Bulletin of KrasGAU*. 2009. No. 2. P. 88–93 (in Russian).
66. Prokushkin S.G., Bogdanov V.V., Prokushkin A.S., Tokareva I.V. Postpyrogenic restoration of vegetation in larch stands of the cryolithozone in Central Evenkia // *Biol. Bull*. 2011. V. 38. P. 183–190. doi: 10.1134/S1062359011020129.
67. Abakumov E., Maksimova E., Tsi bart A. Assessment of postfire soils degradation dynamics: stability and molecular composition of humic acids with use of spectroscopy methods // *Land Degradation & Development*. 2017. V. 29. No. 7. P. 2092–2101. doi: 10.1002/ldr.2872.
68. González-Pérez J.A., González-Vila F.J., Almendros G., Knicker H. The effect of fire on soil organic matter – a review // *Environment International*. 2004. V. 30. P. 855–870.
69. Knicker H. How does fire affect the nature and stability of soil organic nitrogen and carbon? A review // *Biogeochemistry*. 2007. V. 85. P. 91–118.

## Комбинированные расчётные схемы в математических моделях процессов фракционирования зерна

© 2018. В. А. Сысуев<sup>1</sup>, академик РАН, профессор, научный руководитель,  
А. В. Алёшкин<sup>1,2</sup>, д. т. н., профессор, врио директора,  
Ю. В. Сычугов<sup>1</sup>, д. т. н., профессор, с. н. с.,  
А. Ю. Исупов<sup>1,2</sup>, к. т. н., с. н. с.,

<sup>1</sup>Федеральный аграрный научный центр  
Северо-Востока имени Н. В. Рудницкого,  
610007, Россия, г. Киров, ул. Ленина, 166 а,  
<sup>2</sup>Вятский государственный университет,  
610000, Россия, г. Киров, ул. Московская, 36,  
e-mail: priemnaya@fanc-sv.ru

Сельскохозяйственная экология предлагает новые методы и подходы к осуществлению производственных процессов, которые позволят снизить вредное влияние на окружающую среду. В статье изложены подходы к формированию комбинированной расчётной схемы процесса фракционирования зерновых материалов воздушным потоком в горизонтальном канале. Основной идеей метода является последовательное уточнение взаимного влияния зернового и воздушного потоков при расчёте поля скоростей воздуха и траекторий дисперсных частиц. Математическая модель движения воздушного потока построена на основе решения методом конечных элементов уравнений Лапласа для плоского потенциального течения с переменной скважностью. Дифференциальные уравнения движения дисперсных частиц решались численно, с применением метода усреднённого ускорения, с итерациями на каждом шаге и учётом распределения в канале поля скоростей воздушного потока.

Комбинированная расчётная схема выполняется из нескольких итераций с поэтапным приближением к моделируемому процессу пневмосепарации. На первом этапе конечно-элементная модель течения воздушного потока строится без учёта влияния потока зернового материала. На втором этапе решаются дифференциальные уравнения движения частиц зернового материала. По решениям этих уравнений определяется зона большей или меньшей пористости. На следующем этапе проводится перерасчёт скоростей воздушного потока в канале с учётом пористости различных конечных элементов. В зависимости от скоростей воздушного потока изменяется результат решения дифференциальных уравнений движения дисперсных частиц. Таким образом происходит последовательное приближение к описанию процесса взаимодействия зернового и воздушного потоков.

По предложенному алгоритму на языке C# разработана программа, предоставляющая возможность графического и числового контроля результатов расчёта. Интерфейс программы содержит три экранные формы с табличными исходными данными и схемой расположения конечных элементов, на которую, после вычислений, наносятся вектора скоростей воздушного потока и траектории частиц с заданными аэродинамическими свойствами.

Представлены примеры расчёта. По их результатам предложено изменение величины и распределение скоростей воздушного потока на входе в канал, определены положения приёмников фракций в нижней части горизонтального пневмосепарирующего канала.

**Ключевые слова:** зерновой ворох, плющённое зерно, конечно-элементная модель, уравнение Лапласа, пористость, пневмосепарация, фракционирование.

## Combined calculation schemes in mathematical models the fractionation of grain

© 2018. V. A. Sysuev<sup>1</sup>, A. V. Aleshkin<sup>1,2</sup>, Y. V. Sychugov<sup>1</sup>, A. Y. Isupov<sup>1,2</sup>,

<sup>1</sup>Federal Agricultural Research Center of North-East  
named N. V. Rudnitsky,  
166 a, Lenin St., Kirov, Russia, 610007,

<sup>2</sup>Vyatka State University,  
36, Moskovskaya St., Kirov, Russia, 610000,  
e-mail: priemnaya@fanc-sv.ru

Agricultural ecology offers new methods and approaches to the implementation of production processes that will reduce the harmful effects on the environment. The article describes approaches to the formation of a combined calculation scheme of the process of grain materials fractionation by air flow in a horizontal channel. The main idea of the method is a consistent clarification of the mutual influence of grain and air flows in the calculation of the field of air velocities and trajectories of dispersed particles. The mathematical model of air flow motion is based on the finite element solution of the Laplace equations for a plane potential flow with variable porosity. Differential equations of motion of dispersed particles were solved numerically, using the method of average acceleration, with iterations at each step and taking into account the distribution of the air velocity field in the channel.

The combined calculation scheme is constructed from several iterations with a step-by-step approach to the simulated process of pneumoseparation. At the first stage, the finite element model of the air flow is constructed without taking into account the influence of the flow of grain material. In the second stage the differential equation of grain material particles motion are solved. According to the solutions of these equations, the zone of greater or lesser porosity is determined. The next step is to recalculate the air flow rates in the channel taking into account the porosity of the various finite elements. The result of solving the differential equations of motion of dispersed particles varies depending on the air flow velocities. Thus there is a consistent approach to the description of the process of interaction of grain and air flow.

According to the proposed algorithm the computer program in C# language has been developed. It provides the ability to graphically and numerically control the results of the calculation. The program interface contains three screens with tabular data and layout of finite elements, which, after calculations, is applied to the vector of air flow velocity and trajectories of particles with desired aerodynamic properties. Examples of calculation are presented. According to their results, a change in the value and distribution of air flow velocities at the inlet to the channel is proposed, the positions of the fraction receivers in the lower part of the horizontal pneumatic separation channel are determined.

**Keywords:** grain heap, flattened grain, finite element model, Laplace equation, porosity, pneumatic separation, fractionation.

Вредное влияние на окружающую среду может проявляться непосредственно в виде, например, запыления и загрязнения воздуха или косвенно в виде существенного потребления энергии, выработка которой влияет на экологию.

Фракционирование зернового вороха перед сушкой является перспективным способом уменьшения энергозатрат на послеуборочную обработку зерна, так как позволяет фуражные фракции сушить в более жёстком режиме, чем семенные и продовольственные. Плющение зерна и последующее фракционирование даёт возможность проводить консервацию кормов без операции сушки, что также снижает суммарные энергозатраты на переработку и запылённость воздуха при производстве, что сохраняет экологическую обстановку.

Расчёт и моделирование процессов, в устройствах механизации сельскохозяйственного производства, имеют специфику, обусловленную разнообразием физических свойств органических материалов и необходимостью учёта взаимодействия рабочих органов и обрабатываемой среды [1].

Механические повреждения при послеуборочной обработке семян снижают посевные качества и приводят к ухудшению технологических свойств и потере устойчивости при хранении. Одним из эффективных приёмов послеуборочной обработки является пневмосепарация, в которой рабочим органом является воздушный поток, а обрабатываемым материалом – зерновой ворох.

Расчёт взаимного влияния воздушного потока и разделяемого материала является сложнейшей инженерной задачей [1, 2]. В силу многофакторности процессов обработки и неустойчивости характеристик растительных материалов возникает необходимость статистической оценки исходных физических характеристик и результатов расчётов.

Применение конечно-элементных моделей и их использование вместе с другими методами расчётов является основой комбинированной расчётной схемы, предлагаемой в данной работе для исследований процессов механизации в сельскохозяйственном производстве [3, 4]. Метод конечных элементов для расчётов движения сплошной среды позволяет учесть неоднородность области течения и сложную конфигурацию её границ. При пневмосепарации это даёт возможность строить комбинированную итерационную расчётную схему процесса:

- конечно-элементная модель течения воздушного потока в устройстве строится без учёта влияния потока зернового материала;

- дифференциальные уравнения движения частиц зернового вороха или плющеного зерна в невозмущённом воздушном потоке решаются с учётом коэффициента парусности, затем строятся траектории движения частиц основной фракции;

- в зоне движения основной фракции зернового материала изменяется пористость областей течения воздушного потока и проводится расчёт скоростей течения воздушного потока методом конечных элементов с учётом

скважности потока частиц зернового вороха и плющеного зерна;

– проводится повторное решение дифференциальных уравнений движения частиц зернового вороха или плющеного зерна в возмущённом воздушном потоке;

– по траекториям основной фракции корректируется расположение областей пористости течения и повторяется расчёт поля скоростей воздушного потока методом конечных элементов;

– проводится очередное решение дифференциальных уравнений движения частиц вороха в возмущённом воздушном потоке уже для всех фракций обрабатываемого материала.

Траектории частиц и плотности распределения компонентов зерна можно использовать для определения связи конструктивных и технологических параметров, таких как: величина и распределение скоростей воздушного потока на входе в устройство; расположение приёмников фракций, размещение в устройстве дополнительных решёток; зона перекрытия разделяемых фракций на выходе из устройства.

При описании течения в зерновом потоке, по аналогии с пористыми средами, используем уравнение Лапласа в виде:

$$h_x \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + h_y \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} = 0, \quad (1)$$

где  $h_x, h_y$  – коэффициенты фильтрации, задаваемые по локальным осям координат. В элементах со свободным течением  $h_x = 1, h_y = 1$ .

Эффективным приёмом определения коэффициентов  $h_x, h_y$  является эксперимент по расчёту сопротивления зернового слоя в канале (при рабочих скоростях воздуха) в зависимости от пористости потока материала. В первом приближении можно принять, аналогично коэффициенту фильтрации в пористых средах [5]:

$$h = \frac{\varepsilon c d^2}{\mu} \rho, \quad (2)$$

где  $\varepsilon$  – пористость объёма;  $c$  – безразмерный параметр, который определяется из условия  $h = 1$  при отсутствии потока частиц в канале;  $d$  – средний диаметр пор;  $\rho$  – плотность воздуха;  $\mu$  – коэффициент динамической вязкости воздуха.

Траектории частиц определяются как решения дифференциальных уравнений с характерными для каждой определённой фракции её аэродинамическими свойствами. Дифференциальные уравнения движения

отдельной частицы с коэффициентом парусности  $k_n$  в вертикальной плоскости  $(x, y)$  имеют вид:

$$\begin{cases} \ddot{x} = -k_n (\dot{x} - v_{Bx}) \sqrt{(\dot{x} - v_{Bx})^2 + (\dot{x} - v_{By})^2}; \\ \ddot{y} = -g - k_n (\dot{x} - v_{By}) \sqrt{(\dot{x} - v_{Bx})^2 + (\dot{x} - v_{By})^2}, \end{cases} \quad (3)$$

где  $\ddot{x}, \ddot{y}$  – ускорение частицы по горизонтальной и вертикальной оси, соответственно;  $\dot{x}, \dot{y}$  – скорости частицы по осям координат;  $g$  – ускорение свободного падения;  $v_{Bx}, v_{By}$  – скорости воздушного потока в канале, определяемые по результатам решения уравнений Лапласа (1) по потенциалу скоростей  $u$ :

$$\begin{cases} v_{Bx} = h_x \frac{\partial u}{\partial x}; \\ v_{By} = h_y \frac{\partial u}{\partial y}. \end{cases} \quad (4)$$

Метод конечных элементов для решения уравнений Лапласа применяется в несколько этапов [3, 6].

Наиболее сложный этап решения задачи, на котором проводится аппроксимация неизвестной функции  $u$  базисными функциями  $\phi_i$ :

$$u = \sum_{i=1}^S \phi_i u_i = \{\phi\}^T \{u\}^n, \quad (5)$$

где  $i$  – номер узла в местной системе; для треугольного элемента с тремя узлами  $S = 3$ ;

$$\{u\}^n = \begin{Bmatrix} u_1 \\ u_2 \\ u_3 \end{Bmatrix}.$$

Базисные функции  $\{\phi\}^T = (\phi_1, \phi_2, \phi_3)$  линейно зависят от координат внутренней области и представляют собой треугольные  $L$ -координаты [7, 8].

Введём соответствующие матрицы конечных элементов для гармонического уравнения Лапласа (1) с граничными условиями обоих типов:

1)  $u = \bar{u}$  на  $S_1$ ;

2)  $h \frac{\partial u}{\partial n} = \bar{q}_n$  на  $S_2$ ,

$$\bar{q}_n = \alpha_{nx} h_x \frac{\partial u}{\partial x} + \alpha_{ny} h_y \frac{\partial u}{\partial y},$$

где  $\alpha_{nx}, \alpha_{ny}$  – направляющие косинусы нормали к  $S_2$ .

Если аппроксимирующая функция отвечает условию равенства нулю вариации потенциала скоростей на границе  $S_1$ , то, в соответствии с вариационной формулировкой метода Галеркина, запишем [4]:

$$\delta R = \iint_{(A)} - \left\{ h_x \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + h_y \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right\} \delta u dA + \int_{(S_2)} \left( h \frac{\partial u}{\partial n} - \bar{q}_n \right) \delta u dS = 0. \quad (6)$$

Уравнение (6), после интегрирования, для треугольной области приводится к матричному уравнению:

$$[K_e] \{u\} = \{P_e\}, \quad (7)$$

где

$$[K^e] = \frac{1}{4A} \begin{bmatrix} h_x \begin{bmatrix} b_1^2 & b_1 b_2 & b_1 b_3 \\ \text{симметрично} & b_2^2 & b_2 b_3 \\ & & b_3^2 \end{bmatrix} + h_y \begin{bmatrix} a_1^2 & a_1 a_2 & a_1 a_3 \\ \text{симметрично} & a_2^2 & a_2 a_3 \\ & & a_3^2 \end{bmatrix} \end{bmatrix}$$

– матрица коэффициентов влияния конечного элемента, в которой величины  $a_i, b_i$  – зависят от координат его узловых точек по выражениям:

$$a_i = x_k - x_j, \\ b_i = y_j - y_k$$

при  $i = 1, 2, 3; j = 2, 3, 1; k = 3, 1, 2$ . Причём, удвоенная площадь треугольного элемента равна:

$$2A = b_1 a_2 - b_2 a_1.$$

Правая часть уравнения (7) определяется через поток границы элемента, так для стороны между узлами 2 и 3 (рис. 1.):

$$\{P_e\} = \bar{q}_n \begin{Bmatrix} 0 \\ l/2 \\ l/2 \end{Bmatrix},$$

где  $l$  – длина стороны элемента,  $\bar{q}_n$  – среднее значение скорости потока через границу.

В результате объединения по всем конечным элементам уравнений (7) и наложения главных граничных условий получаем систему линейных уравнений для расчёта потенциала скоростей в узловых точках области течения. Затем по выражениям (4) находим скорости воздушного потока в каждом конечном элементе. Решение дифференциальных уравнений (3) проводилось численно. Применялся метод усреднённого ускорения [9]. В процессе интегрирования проекции скорости потока

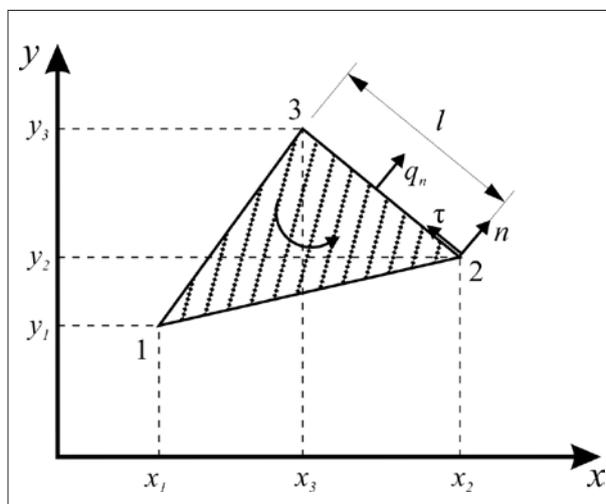


Рис. 1. Локальные номера узлов  
Fig. 1. Local numbers of nodes

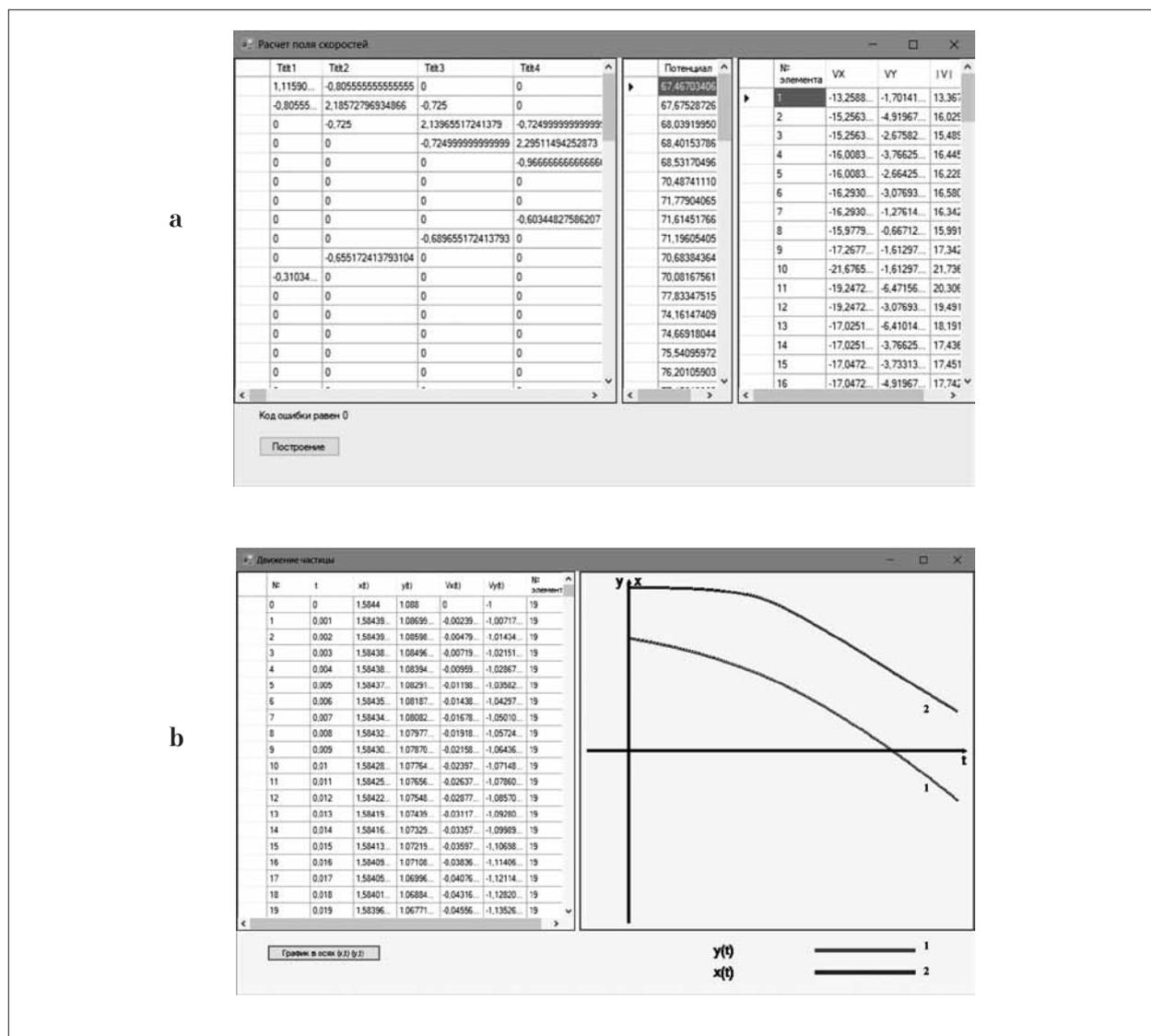
воздуха, подставлялись в зависимости от того, в каком конечном элементе движется дисперсная частица. Комбинированный алгоритм совместного расчёта поля скоростей воздушного потока и траекторий фракций зернового вороха заложен в программе на языке C# в среде MS Visual Studio. На рисунке 2 (см. цветную вкладку) представлена схема разбиения горизонтального канала пневмосепаратора для фракционирования зернового вороха.

Результат построения поля скоростей и траектории частицы, которая вводится с вертикальной скоростью 1 м/с вниз в двенадцатом узле и имеет критическую скорость витания представлена на рисунке 3 (см. цветную вкладку), при этом длина векторов скоростей воздушного потока пропорциональна их расчётной величине. Элементы, имеющие коэффициент фильтрации меньше единицы (соответствует потоку основной зерновой фракции), закрашиваются тёмной заливкой при считывании информации из топологической матрицы.

Аналогично построены траектории движения всех фракций зернового вороха. Расчёты проводились при различных граничных условиях для воздушного потока и варьируемых характеристиках потока обрабатываемого материала. На рисунке 4 представлен пример табличных данных по результатам расчётов скоростей воздуха и координат дисперсных частиц.

Сделаны рекомендации по соотношению размеров канала и расположению приёмников фракций для последующей оптимизации пневмосепаратора экспериментальными методами [10].

Выводы. По результатам расчётов предложено изменение величины и распределение



**Рис. 4.** Пример табличных данных по результатам расчётов:  
 а) скоростей воздуха; б) координат дисперсных частиц  
**Fig. 4.** Example of tabular data on the results of calculations:  
 а) air velocity; б) coordinates of the dispersed particles

скоростей воздушного потока на входе в канал, обратно пропорционально коэффициенту фильтрации потока зернового вороха и плущёного зерна, что повысит эффективность разделения на фракции, позволит снизить удельные энергозатраты. Рекомендуемые соотношения размеров канала и расположение приёмников фракций подлежат дальнейшей оптимизации экспериментальными методами.

Комбинированная расчётная схема позволяет учесть взаимное влияние рабочей среды и обрабатываемого материала на выходные параметры процесса фракционирования зернового вороха, такие, как конечные точки траекторий каждой фракции при различных распределениях скоростей воздушного потока на входе в канал и других технологических

особенностях устройства. Так в приведённом примере расчёта, зерновой поток сопровождался сопутствующим воздушным потоком, что учитывалось в естественных граничных условиях на верхней границе канала между узлами 11–12 (рис. 2, см. цветную вкладку).

Конечно-элементные модели рекомендуются как универсальные составляющие комбинированных расчётных схем для описания технологических процессов в средствах механизации обработки растительных материалов, с помощью которых выбираются начальные значения факторов при экспериментальной оптимизации соответствующих устройств производственного цикла непосредственно связанных с экологией послеуборочной обработки зерна.

Литература

References

1. Сысуев В.А., Алешкин А.В., Савиных П.А. Кормоприготовительные машины. Теория, разработка, эксперимент: В двух томах. Киров: Зональный НИИСХ Северо-Востока, 2008. Т. 1, 2. 1200 с.
2. Сычугов Н.П., Вайсман А.А., Алешкин А.В. Математическое моделирование взаимодействия зерновой струи с воздушным потоком. М.: 1991, деп. в ЦНИИТЭИ Автосельхозмаш: № 1388. 29 с.
3. Зенкевич О., Морган К. Конечные элементы и аппроксимация. М.: Мир, 1986. 316 с.
4. Коннор Дж., Бреббия К. Метод конечных элементов в механике жидкости. Л.: Судостроение, 1979. 264 с.
5. Чугаев Р.Р. Гидравлика. Л.: Энергия, 1971. 552 с.
6. Алешкин А.В. Алгоритм определения изменения поля скоростей воздушного потока в пневмосепарирующем канале под действием зернового слоя // Наука – производство – технология – экология: Сб. материалов Всероссийской научн.-техн. конф. ВятГТУ. Киров, 2001. Т. 3. С. 214–215.
7. Оден Дж. Конечные элементы в нелинейной механике сплошных сред / М.: Мир, 1976. 464 с.
8. Постнов В.А., Хархурим И.Я. Метод конечных элементов в расчетах судовых конструкций. Л.: Судостроение, 1974. 344 с.
9. Тимошенко С.П., Янг Д.Х., Уивер У. Колебания в инженерном деле. М.: Машиностроение, 1985. 472 с.
10. Мельников С.В., Алешкин В.Р., Рощин П.М. Планирование эксперимента в исследованиях сельскохозяйственных процессов. Л.: Колос, 1980. 168 с.

1. Sysuyev V.A., Aleshkin A.V., Savinykh P.A. Corporation machinery. Theory, development, experiment: in two volumes. Kirov: Zonalnyy NIISKh Severo-Vostoka, 2008. V. 1, 2. 1200 p. (in Russian).
2. Sychugov N.P., Vaisman A.A., Aleshkin A.V. Mathematical simulation of grain interaction of the jet with the air flow. Moskva, 1991. Dep. in TSNIITEI Avtosekhoz-mash: No. 1388. 29 p. (in Russian).
3. Zienkiewicz O.C., Morgan K. Finite elements and approximation. Moskva: Mir, 1983. 318 p. (in Russian).
4. Connor J., Brebbia K. Finite element method in fluid mechanics. Leningrad: Sudostroenie, 1979. 264 p. (in Russian).
5. Chugaev P. P. Hydraulics. L.: Energiya, 1971. 552 p. (in Russian).
6. Aleshkin A.V. An algorithm for determination of changes of the velocity field of air flow in pneumocephalus channel under the action of a grain of the first layer // Nauka – proizvodstvo – tekhnologiya – ekologiya: Sb. materialov Vserossiyskoy nauchn.-tekhn. konf. VyatGTU. Kirov, 2001. V. 3. P. 214–215 (in Russian).
7. Oden J. Finite elements in nonlinear continuum mechanics. M.: Mir, 1976. 464 p. (in Russian).
8. Postnov V.A., Hirhurim I.J. Finite element method in ship structures accounts. Leningrad: Sudostroenie, 1974. 344 p. (in Russian).
9. Timoshenko S.P., Young D.H., Weaver W. The fluctuations in the engineering. M.: Mashinostroenie, 1985. 472 p. (in Russian).
10. Melnikov S.V., Aleshkin V.P., Roshchin P.M. Experiment planning in researches of agricultural processes. Leningrad: Kolos, 1980. 168 p. (in Russian).

## Почвообразование на техногенных озёрных илах

© 2018. Е. В. Дабах<sup>1,2</sup>, к. б. н., доцент, с. н. с.,

<sup>1</sup> Вятская государственная сельскохозяйственная академия,  
610017, Россия, г. Киров, Октябрьский проспект, 133,

<sup>2</sup> Институт биологии Коми НЦ УрО РАН,  
167982, Россия, г. Сыктывкар, ул. Коммунистическая, 28,  
e-mail: dabakh@mail.ru

Статья посвящена почвам техногенного ландшафта (Technosols по WRB), формирующимся на загрязнённых техногенных озёрных отложениях, вышедших на дневную поверхность после изменения гидрологического режима и прекращения поступления в озеро загрязнённых сточных вод. Исследуемая территория расположена в долине р.Вятки в районе хвостохранилищ химических предприятий г. Кирово-Чепецка (Кировская область, Россия). Мощность почвенного профиля ограничена плотной гипсовой коркой, залегающей на глубине 30 см и способствующей переувлажнению почв. В отличие от окружающих кислых аллювиальных почв, они характеризуются щелочной реакцией, контрастностью верхней и нижней частей молодой почвы. Участие аллювиального процесса и влаголюбивой растительности в формировании профиля приводит к изменению состава и свойств почвы, особенно верхних горизонтов. По сравнению с донными осадками и нижними слоями почв в верхних горизонтах выше доля алюмосиликатного компонента в минералогическом и химическом составах, ниже щёлочность, резко снижается уровень загрязнения. По биологическим показателям оторфованная подстилка и гумусовый горизонт близки к гумусовым горизонтам окружающих аллювиальных почв.

Почвенный и растительный покровы, формирующиеся на техногенных озёрных илах в пойме, препятствуют активному размыву в паводок нижележащей неструктурной загрязнённой «надкорковой» илистой массы и растворению гипсовых новообразований – кор, сдерживающих подвижность мощной толщи загрязнённых техногенных отложений.

**Ключевые слова:** почвообразование, техногенные илы, гипсовые коры, химическое загрязнение почв.

## Soil formation on technogenic lake sediments

© 2018. E. V. Dabakh<sup>1,2</sup> ORCID: 0000-0002-6088-4819,

<sup>1</sup> Vyatka State Agricultural Academy,  
113, Oktyabrskiy Prospekt, Kirov, Russia, 610017,

<sup>2</sup> Institute of Biology of Komi Scientific Centre of the Ural Branch RAS,  
28, Kommunisticheskaya St., Syktyvkar, Komi Republic, Russia, 167982,  
e-mail: dabakh@mail.ru

The article is devoted to soils of the technogenic landscape (Technosols according to WRB) formed on contaminated man-caused lake sediments that have come on the daylight area after a change in the hydrological regime and the stopping of contaminated sewage into the lake. The investigated territory is located in the Vyatka Valley in the tailing pits of chemical enterprises in Kirovo-Chepetsk (Kirov Region, Russia). The thickness of the soil profile is limited by a dense gypsum crust lying at a depth of 30 cm and contributing to waterlogging of soils. Unlike the surrounding acidic alluvial soils, they are characterized by an alkaline reaction, contrast of the upper and lower parts of the young soil. The participation of the alluvial process and moisture-loving vegetation in the formation of the profile leads to a change in the composition and properties of the soil, especially the upper horizons. In comparison with the bottom sediments and the lower layers of soils in the upper horizons, the share of the aluminosilicate component in the mineralogical and chemical compositions is higher, the alkalinity is lower, and the pollution level sharply decreases. According to biological indices, the decayed litter and humus horizon are close to the humus horizons of surrounding alluvial soils. The soil and vegetation cover formed on technogenic lake sediments in the floodplain prevents active erosion of the underlying undeveloped contaminated sediments during the flood time and the dissolution of gypsum crusts, which inhibit the mobility of contaminated technogenic deposits.

**Keywords:** soil formation, technogenic sediments, gypsum crust, chemical soil contamination.

В условиях техногенеза вокруг промышленных зон городов сформировались природно-техногенные системы, в которых разнообразие почвообразующих пород возрастает благодаря техногенным отложениям различного характера. Сочетание техногенного (почвообразующая порода) и природных факторов (климата, рельефа, растительности, поверхностных и подземных вод) обеспечивает формирование своеобразных почв, не типичных для данной местности. В связи с этим представляют интерес почвы, формирующиеся на гипсово-карбонатной породе в долине реки Вятки в районе центра химической промышленности – г. Кирово-Чепецка Кировской области.

Выходы пород, содержащих гипс, довольно редко встречаются в таёжно-лесной зоне, и почвообразование на таких породах возможно благодаря тому, что «скорость физической дезинтеграции существенно превышает скорость растворения мономинерального субстрата» [1]. Содержащие гипс техногенные отложения в долине р. Вятки образовались на дне пойменного озера в результате поступления промышленных сточных вод, насыщенных сульфатами и карбонатами щелочных, щелочноземельных элементов и аммония. После проведения природоохранных мероприятий изменился химический состав вод, гидрологический режим водоёма, техногенные донные осадки вышли на поверхность. Вследствие прекращения поступления загрязнённых поверхностных вод началось восстановление экосистемы в новых условиях. На техногенных илах начал формироваться почвенный покров. Длительность почвообразования 30–40 лет.

Целью настоящей работы было изучение направления почвообразования и особенностей почв, формирующихся на техногенных илах – донных отложениях, вышедших на поверхность в результате изменения гидрологического режима водоёма.

Задачи исследования включали: изучение морфологических и химических особенностей техногенных отложений и формирующихся на них почв, выявление их отличий от природных почв, определение направления и скорости почвообразования в процессе восстановления территории после техногенного воздействия.

### Объекты и методы исследования

Исследуемая территория расположена на северо-востоке европейской части России, на северо-западной окраине Вятско-Камской

провинции подзоны дерново-подзолистых почв южной тайги. Климат относится к континентальному умеренному типу. Среднегодовая температура составляет +2,4 °С. Средняя температура января -13,7 °С, июля +18,4 °С. Территория находится в зоне достаточного увлажнения: среднегодовое количество осадков – в пределах 560–580 мм, 60–70% выпадает в тёплое время года. Преобладающими ветрами в течение года являются юго-юго-западные, повторяемость южных ветров составляет около 20%, юго-западных – 18%. В январе частота юго-юго-западных ветров возрастает до 45% [2]. Исследуемый участок притеррасной поймы реки Вятки в районе озера Просного ежегодно затопливается во время весеннего половодья, длительность затопления от 10 до 20 суток. Пик половодья обычно приходится на первую декаду мая.

Притеррасное озеро Просное было последним водным объектом в системе водоотведения химических предприятий г. Кирово-Чепецка, и до ввода в эксплуатацию шламонакопителей и хвостохранилищ в течение 25 лет жидкие отходы попадали в озеро, растворённые и взвешенные вещества оседали, формируя толщу техногенных илов, объём которых составляет около 330 тыс. м<sup>3</sup> [3]. До начала функционирования химического комбината площадь озера была 10 га, протяжённость – около 1,5 км, озеро было бессточным (рис. 1). В настоящее время озеро Просное вытянуто в длину на 400 м, современная площадь его составляет около 3,4 га. В результате заиливания около 70% территории озера превратилось в заболоченную низменность, по которой протекает река Елховка, сток реки почти на 50% формируется сточными водами промышленных предприятий. Между озером и притоком реки Вятки р. Просницей (старое название Волошка) появилась искусственная протока. На техногенных илах, заполнивших озеро и вышедших на дневную поверхность, активно идёт почвообразование и заселение прибрежно-водной растительностью.

Объектами исследования были техногенные отложения и формирующиеся на них почвы, образцы которых отбирались на заиленной части оз. Просного.

Подобные почвы в международной классификации WRBSR на самом высоком таксономическом уровне выделены как Техносолы (Technosols) [4, 5].

Техногенные отложения отбирались на всю глубину залегания до минерального дна (4–6 м) с помощью ручного бура с интервалом

опробования 80 см, образцы почв отбирались из горизонтов профиля. Фоновая проба донных отложений отобрана из р. Елховки выше по течению зоны влияния химических предприятий.

Химический анализ проб почв и донных отложений проводился в экоаналитической лаборатории Вятского государственного университета (ВятГУ), на кафедре почвоведения, мелиорации, землеустройства и химии Вятской государственной сельскохозяйственной академии (ВГСХА) по общепринятым методам. Валовое содержание и концентрации подвижных соединений элементов, извлекаемых ацетатно-аммонийным буферным раствором с рН 4,8, определялись в Аналитическом сертификационном испытательном центре Института проблем технологии микроэлектроники и особо чистых материалов РАН (г. Черноголовка) методами масс-спектрометрии и атомно-эмиссионной спектрометрии с индуктивно связанной плазмой. Минералогический состав почв изучался рентгендифрактометрическим

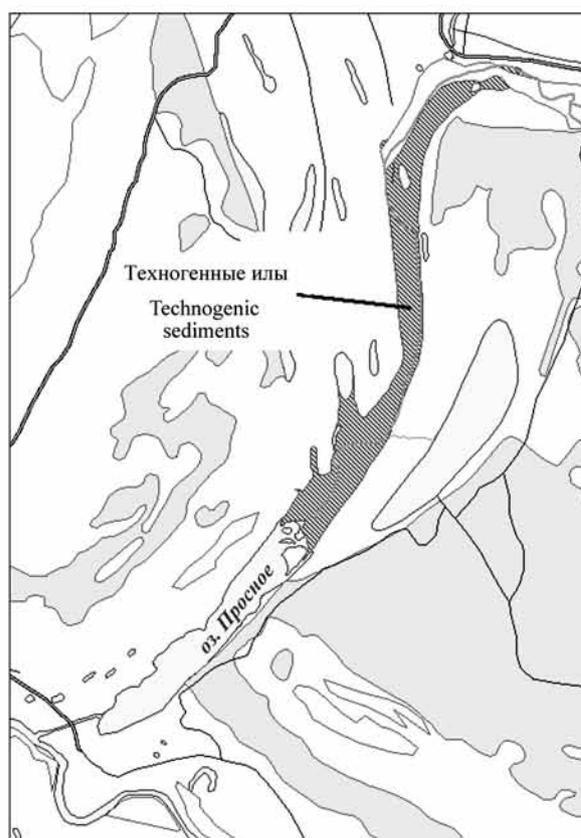
методом в лаборатории минералогии кафедры химии почв МГУ им. М.В. Ломоносова.

### Результаты и обсуждение

*Морфологическая характеристика техногенных илов и почв.* Мощность техногенных донных отложений озера Просное достигает 6 м, по консистенции это вязкая масса неоднородного серого цвета (рис. 2). Внешние признаки техногенных илов оз. Просное соответствуют морфологическим свойствам, присущим техногенным донным образованиям водных объектов [6]. Техногенные илы представляют собой пластичные глины, состоящие на 70–80% из карбоната и сульфата кальция. В их толще встречаются твёрдые гипсовые коры. В месте заложения почвенного разреза мощность илов составляла 4 м, кора выявлена на глубине 0,3 м от поверхности, а также на глубинах 0,6 и 3,1 м. Мощность кор невелика – от нескольких миллиметров до первых сантиметров (рис. 3). Над первой от



Старая акватория оз. Просное (1952 г.)  
Old water area of the Prosnoye Lake (1952)



Современная акватория оз. Просное  
Current water area of the Prosnoye Lake

Рис. 1. Карты-схемы, отражающие изменение морфометрических характеристик озера со временем  
Fig. 1. Schematic maps showing the change in the morphometric characteristics of the lake with time



**Рис. 2.** Отбор проб техногенных илов на оз. Просном  
**Fig. 2.** Sampling of technogenic sediments on the Prosnoye Lake



**Рис. 3.** Гипсовые коры  
**Fig. 3.** Gypsum crusts



**Рис. 4.** Профиль почвы на техногенных илах  
**Fig. 4.** Soil profile on technogenic sediments

поверхности корой залегает рыхлая щебнистая серовато-белая масса, которую только условно можно рассматривать как почвообразующую породу, поскольку в пойме почвообразование и литогенез происходят одновременно.

В профиле почвы выделены следующие горизонты: оторфованная подстилка мощностью 7–10 см, гумусовый горизонт мощностью около 3–4 см, сизоватая со ржавыми пятнами сырая глинистая масса глеевого горизонта мощностью до 8 см и почвообразующая порода – мокрый серовато-белый щебнистый горизонт (рис. 4). По морфологическим особенностям профиля можно диагностировать проявление подстилкообразования, гумусообразования и глеевого процесса.

*Химический состав техногенных илов и почв.* Макроэлементный состав пяти проб техногенного ила, отобранных с разных глубин, близкий. В связи с этим в таблице 1 приведены средние содержания оксидов элементов в 5 пробах из одного шурфа (ТИ-2).

В отличие от слагающего пойму аллювия и современных донных осадков, в валовом химическом составе техногенных илов отмечается очень высокое содержание кальция (20–30%) и серы (5–10%), низкое – алюминия, железа, калия и натрия.

В микроэлементном составе техногенных илов отмечаются существенные различия по глубинам. В составе верхней части техногенных отложений отмечено высокое содержание ртути, свинца, цинка, стронция, кадмия, мышьяка (от 1 до 7 ПДК). В нижних слоях техногенных наносов содержание микроэлементов возрастает. Данные по 8 шурфам позволяют обозначить приуроченность максимальных концентраций ряда элементов к определенным глубинам (табл. 2).

Максимальное накопление висмута и кадмия отмечено на глубинах от 0,4 до 1,2 м, цинка,

олова, сурьмы, свинца и ртути – глубже 4,5 м, при этом концентрации тяжёлых металлов в илах выше кларка (по А.П. Виноградову) и ПДК для почв по всей глубине шурфа.

Содержание тяжёлых металлов и мышьяка в техногенных илах значительно выше, чем в пойменном и русловом аллювии. По сравнению с кларком пойменный аллювий отличается высоким содержанием мышьяка, донные отложения – ртути. Коэффициент техногенного загрязнения илов [4] превышает 32 и позволяет оценить степень загрязнения как опасную. Формулы геохимической ассоциации [7] в техногенных илах, опробованных непосредственно в месте заложения почвенного разреза, следующие:

$Pb_{41}-Hg_{31}-Cd_{23}-Bi_{13}-(Sb-Ag)_6-(Zn-Y)_4-Mo_3-As_2-(Sr-U)_{1,5}$  в слое 0–0,8 м;

$Hg_{64}-Pb_{51}-Sb_{32}-Sn_{13}-Y_{12}-Cd_{10}-Zn_8-(Bi-Ag)_7-(Ba-As)_3-Mo_2-U_{1,6}$  на глубине 3,2–4 м.

Они свидетельствуют о комплексном загрязнении илов и, несмотря на существенные различия в содержании загрязняющих веществ в толще илов, указывают, что максимальные коэффициенты концентрации характерны для свинца и ртути.

Химический состав почв, сформировавшихся на техногенных отложениях, представлен в таблицах 3, 4, 5.

Согласно приведённым данным, нижние минеральные слои почв по валовому химическому составу ближе к техногенным илам, чем к органоминеральным горизонтам (табл. 3). Однако по сравнению с илами в почвах отмечены более высокие концентрации алюминия, железа, марганца, фосфора, калия. Выявлены резкие различия между почвой и техногенными илами по содержанию серы, связанные, по-видимому, со значительным участием гипса в формировании кор и подкорковых глин. В верхних горизонтах содержание кальция

Таблица 1 / Table 1

Валовой состав техногенных илов (ТИ-2), пойменного аллювия (р. 940) и современных донных отложений (фон), %  
The total composition of technogenic sediments (TS-2), floodplain alluvium (r. 940) and modern bottom sediments (background), %

Проба Sample	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	MgO	K <sub>2</sub> O	Na <sub>2</sub> O	MnO	TiO <sub>2</sub>	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	Собщ Stotal
ТИ-2	2,5±	1,40±	30,7±	1,70±	0,26±	0,25±	0,06±	0,09±	0,07±	7,18±
TS-2	0,3*	0,14	2,1	0,08	0,04	0,05	0,02	0,01	0,03	2,07
р. 940 г. 940	9,8	4,3	1,0	1,5	1,2	1,2	0,15	0,5	0,12	0,032
Фон Back- ground	6,6	4,0	6,3	1,4	1,4	0,82	0,14	0,40	0,13	0,073

Примечание: \* Стандартное отклонение  
Note: \* Standard deviation

Таблица 2 / Table 2

Максимальные концентрации тяжёлых металлов (ТМ) и мышьяка в техногенных илах, мг/кг  
The maximum concentrations of heavy metals (HM) and arsenic in technogenic sediment, mg/kg

Элемент Element	Cd	Bi	Zn	Sn	Sb	Pb	As	U	Hg	Cu
Максимальные концентрации, мг/кг Maximum concentration, mg/kg	4,3	2,5	2044	55,7	163	1124	50,7	32,2	30,4	295
Интервал глубин с максимальным содержанием элемента, м Depth interval with the maximum element content, m	0,4–1,2		4,4–5,2				5,2–6,0			
Кларк (по Виноградову, 1949 г./1962 г.) Clark (according to Vinogradov, 1949/1962)	5/ 0,13	0,2/ 0,009	58/ 83	40/ 2,5	0,5/ 0,4	16/ 16	5/ 1,7	3/ 2,5	0,07/ 0,083	100/ 47
Содержание элемента в пойменном аллювии Element content in floodplain alluvium	0,18	0,22	78,4	1,7	0,87	16,1	19,2	7,6	0,035	40,4
Содержание элемента в фоновой пробе донных отложений The content of the element in the background sediment sample	0,23	0,11	90,5	1,3	0,79	18,8	5,2	2,0	0,30	115

Таблица 3 / Table 3

Валовой химический состав почв на техногенных отложениях, %  
The total chemical composition of soils on technogenic sediments, %

Глубина, см Depth, cm	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	MgO	K <sub>2</sub> O	Na <sub>2</sub> O	MnO	TiO <sub>2</sub>	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	S <sub>общ</sub> S <sub>total</sub>
0–7	8,7	5,2	5,6	1,6	1,0	0,42	0,84	0,41	0,51	0,23
7–11	10,0	6,2	7,7	1,8	1,1	0,46	0,46	0,48	0,57	0,18
11–18	4,3	2,6	34,7	0,91	0,41	0,25	0,17	0,20	0,32	0,29
18–30	4,0	2,0	34,6	1,1	0,40	0,29	0,12	0,17	0,30	0,40
ТИ-2/ TS-2	2,5	1,4	30,7	1,7	0,26	0,25	0,06	0,09	0,07	7,18

значительно ниже, что соответствует минералогическому составу почв. Согласно данным рентгендифрактометрического анализа, в нижних горизонтах почв абсолютно преобладает кальцит, в верхних – доля кальцита снижается, но отчётливо диагностируются кварц, глинистые минералы-алюмосиликаты: разбухающий смешаннослойный минерал, гидрослюды.

Микроэлементный состав почв также показал, что исходная неоднородность наносов сохраняется (табл. 4). Верхняя органоминеральная толща резко отличается от нижних горизонтов. Во всех горизонтах отмечается превышение предельно допустимых значений цинка, кадмия, сурьмы, ртути, свинца, а также превышение фонового содержания стронция. Накопление в органогенном горизонте стронция может быть обусловлено как современным аллювиальным процессом, так и биогенной аккумуляцией элемента. Сравнительный анализ

микроэлементного состава изучаемой почвы и типичной для данного участка поймы аллювиальной дерново-глеевой почвы позволил выявить незначительное отличие содержания ТМ и мышьяка в верхних горизонтах обеих почв [8]. Однако концентрации загрязняющих веществ резко возрастают в нижних слоях почвы, формирующейся на техногенных отложениях, и, напротив, постепенно снижаются вниз по профилю природной почвы.

Уровень загрязнения, согласно суммарному показателю загрязнения  $Z_c$ , оценивается как допустимый в верхних слоях и средний – в нижних.

Концентрации подвижных соединений тяжёлых металлов, извлекаемых ацетатно-аммонийным буферным раствором с рН 4,8 (ААБ), либо близки к ПДК, либо значительно превышают нормативные значения (табл. 5).

Наибольшее количество обменных форм меди, цинка и свинца характерно для мине-

Таблица 4 / Table 4  
Содержание микроэлементов в почвах на техногенных илах, мг/кг  
The content of trace elements in soils on technogenic sediments, mg/kg

Глубина, см Depth, cm	Ni	Cu	Zn	As	Sr	Cd	Sn	Sb	Hg	Pb	Bi	Zc
0–7	86,8	81,1	308	11,6	606	3,1	2,1	9,8	3,8	183	0,89	5,4
7–11	83,2	91,6	319	13,0	479	2,9	2,4	9,8	3,0	189	1,1	4,3
11–18	47,0	176	560	8,6	435	7,3	2,6	6,4	14,0	465	3,1	14
18–30	50,7	154	601	7,3	441	9,8	2,7	22,7	27,0	434	2,6	25
ПДК (ОДК), фон* MPC (APC), background*	80	132	220	10	118*	2	2,5*	4,5	2,1	130	н/д n/d	–

Примечания: Фон\* – фоновое содержание элемента в почвах Кировской области; ПДК приведены по ГН 2.1.1.2041-06; 80 – ОДК для суглинистых почв с рН > 5 (по ГН 2.1.1.2042-06); н/д – данные отсутствуют.

Notes: Background\* – background content of the element in the soils of the Kirov region; the maximum permissible concentrations are given in the GN 2.1.1.2041-06 (Russian hygienic standards); 80 – approximate permissible concentrations (APC) for loamy soils with рН > 5 (according to GN 2.1.1.2042-06); n/d – no data.

Таблица 5 / Table 5  
Содержание подвижных соединений тяжёлых металлов  
The content of mobile compounds of heavy metals

Глубина, см Depth, cm	Концентрации подвижных соединений ТМ, мг/кг (числитель) % от валового содержания (знаменатель) Concentrations of mobile compounds of HM, mg/kg (numerator) % of total content (denominator)				
	Cu	Zn	Cd	Ni	Pb
0–7	1,7/2,0	81,6/26,5	1,9/61	3,4/4	7,9/4,3
7–11	2,4/2,6	78,9/24,7	2,0/68	4,2/5	12,4/6,6
11–18	39,4/22,4	147/26,2	5,1/70	5,1/10,9	116/24,9
18–30	24,3/15,8	157/26,1	7,0/71	5,7/11,2	155/35,7
ПДК / MPC	3	23	–	4	6

ральных горизонтов. Вероятно, это объясняется высоким исходным уровнем загрязнения надкорковых отложений, а также содержанием карбонатов в этих горизонтах. По мнению [9], в ААБ вытяжку переходят не только обменные, но и прочно связанные ионы металлов, удерживаемые тонкодисперсными («активными») карбонатами. Соотношения подвижных и валовых форм элементов показывают, что высокое общее содержание ТМ в почве сопровождается увеличением концентрации его подвижных соединений. Исключением является цинк, доля подвижных соединений которого во всех горизонтах составляет около 25%. Цинк отличается большей подвижностью. При высоких значениях рН возрастает роль растворимых комплексов цинка с органическими веществами и комплексных анионных форм цинка [10]. Можно предположить, что в данном случае именно более высокая концентрация органического вещества в верхних горизонтах при меньшем общем содержании элемента обеспечивает его высокую подвижность. По нашим данным [11], в аллювиальных почвах, сформировавшихся на алюмосиликатных породах в пойме р. Вятки, доля подвижных соединений от валовых концентраций независимо от подтипа составляла от 7 до 15% для свинца, 10–15% для цинка, 0,7–2,6% для меди, от 1,2 до 6% для никеля, около 30% – для кадмия. Соотношения концентраций подвижных соединений и валовых содержаний меди, свинца, никеля в верхних горизонтах (табл. 5), укладываются в указанные диапазоны. Высокие соотношения показателей, отмеченные в нижних слоях техногенных почв, соответствуют значениям, рассчитанным для современных донных отложений р. Елховки, и являются косвенным подтверждением загрязнения почв тяжёлыми металлами.

Суммарное содержание редкоземельных элементов (РЗЭ) в почвах на техногенных отложениях оказалось ниже, чем в природных аллювиальных почвах (табл. 6), хотя в нижних горизонтах оно близкое.

Концентрации всех элементов, за исключением Sc, ниже или близки к кларкам (по Виноградову, 1962). Содержание скандия в два раза превышает кларк элемента. В техногенных почвах лантаноиды (Ln) и Sc содержатся в количествах, не превышающих кларки, содержание Y – повышенное в нижних слоях профиля.

Концентрации Ln и РЗЭ в целом в природных почвах характеризуются аккумулятивным распределением по профилю. В техногенных почвах также отмечается накопление Ln в гумусовом горизонте, но распределение РЗЭ в целом по минеральным горизонтам равномерное. Равномерность распределения РЗЭ обеспечивается за счёт резкого (в 2 раза) увеличения содержания Y в двух нижних слоях почвы на техногенных илах.

В распределении отдельных Ln по профилю проявлялись следующие особенности: в обеих почвах отмечалось относительное накопление в гумусовом горизонте А1 лантаноидов от La до Eu, концентрации остальных элементов этого ряда от Gd до Lu постепенно возрастали в техногенных почвах и снижались в природных аналогах [12].

Вероятно, такое распределение подтверждает различное геохимическое поведение лёгких и тяжёлых лантаноидов. В литературе отмечалось, что органические лиганды образуют с тяжёлыми лантаноидами более прочные растворимые комплексы, поэтому доля сохранившихся лёгких лантаноидов в почвах выше (цитировано по [13]).

Таблица 6 / Table 6

Суммарное содержание лантаноидов и РЗЭ в почвах поймы  
The total content of lanthanides and rare earth elements (REE) in the soils of the floodplain

Глубина, см Depth, cm	Содержание лантаноидов, мг/кг Content of lanthanides, mg/kg	Общее содержание РЗЭ, мг/кг Total REE content, mg / kg
Почва на техногенных илах / Soil on technogenic sediments		
0–7	107,79	144,19
7–11	120,97	163,56
11–18	105,24	160,84
18–30	107,35	167,05
Почва на аллювии / Soil on alluvium		
0–7	151,50	197,84
7–16	155,67	197,96
16–26	145,73	184,65
26–50	129,75	166,78

Таблица 7 / Table 7

Свойства почв на техногенных илах  
Properties of soils on technogenic sediments

Глубина, см Depth, cm	Содержание органического вещества, % Organic matter content, %	pH водн. pH <sub>н<sub>2</sub>О</sub>	pH сол. pH <sub>КCl</sub>
0–7	23,8±2,4	7,6±0,2	6,9±0,2
7–11	18,6±1,9	7,8±0,2	7,2±0,2
11–18	7,4±,7	8,0±0,2	7,9±0,2
18–30	6,8±0,7	7,9±0,2	7,7±0,2

Свойства почв на техногенных отложениях. Почвы на техногенных илах отличаются слабощелочной реакцией, причём вниз по профилю pH возрастает (табл. 7). В окружающих аллювиальных почвах значения pH соответствуют слабокислой реакции среды (около 5,5).

Почти одинаковые значения pH в водной и солевой вытяжках в нижних слоях почвы свидетельствуют о насыщенности их основаниями. Содержание органического вещества высокое, закономерно снижается вниз по профилю. Несомненно, в оторфованной подстилке значительную часть органического вещества составляют растительные остатки.

В процессе почвообразования на техногенных осадках существенную роль в создании лабильного органического вещества играют фототрофные микроорганизмы [14]. Альгологический анализ почвенных образцов показал, что в процессе преобразования техногенных осадков в пойме наблюдается массовое развитие водорослей и цианобактерий (ЦБ), чётко дифференцированное в зависимости от горизонтов по видовому и количественному представительству. Видовое богатство фототрофов представлено 34 видами водорослей и ЦБ, в том числе из отдела Cyanophyta – 7, Chlorophyta – 23, Xanthophyta – 2, Bacillariophyta – 2. При этом наблюдается ярко выраженная тенденция снижения видового богатства с глубиной. Представители Cyanophyta размножаются только в 2-х верхних горизонтах. Только в верхнем горизонте встречаются жёлтозелёные (Xanthophyta) и диатомовые (Bacillariophyta) водоросли. Преобладание видового разнообразия в отделах Chlorophyta характерно и для аллювиальных дерновых почв окружающих пойменных лугов [15]. В этом отделе три вида (*Chlorella vulgaris*, *Chlorococcum infusionum* и *Pseudococcomyxa simplex*) обнаружены в каждом горизонте, что, вероятно, свидетельствует о максимально высокой экологической валентности данных видов, так как условия обитания (аэрация, световой режим, химический состав и т. д.) в горизонтах резко различаются. Хотя

максимальное видовое разнообразие характерно для зелёных водорослей, максимальное количественное обилие отмечено у ЦБ, развивающихся в верхних горизонтах. Микрофототрофы, благодаря высокой скорости размножения, способны создавать значительные объёмы первичной продукции, пополняя запасы органического вещества почвы [14].

### Выводы

Таким образом, в долине реки Вятки в районе г. Кирово-Чепецка после прекращения поступления в пойменное озеро загрязнённых сточных вод химических предприятий и изменения гидрологического режима на поверхность вышли техногенные донные отложения, на которых начали формироваться почвы. Техногенные илы представляют собой вязкую серую массу, характеризуются опасным уровнем загрязнения, прежде всего, свинцом и ртутью. Морфологические особенности формирующихся на них почв заключаются в малой мощности профиля и наличии водоупора в виде гипсовой корки, в оторфованности подстилки и присутствии отчётливых признаков оглеения. В химическом составе почв проявляется, с одной стороны, исходная неоднородность и загрязнённость техногенного ила, с другой – участие свежего аллювия алюмосиликатного состава.

Почвы загрязнены тяжёлыми металлами, мышьяком, стронцием. В верхней части профиля уровень загрязнения слабый, в нижней – умеренный. В нижних слоях возрастает концентрация ртути, свинца, цинка, сурьмы, а также увеличивается подвижность ТМ (меди, цинка, свинца), почти в два раза выше кларка содержание иттрия. Следовательно, почвы наследуют высокую исходную загрязнённость техногенных илов, однако их верхние горизонты, благодаря участию свежего аллювия и более активному вовлечению элементов в биологический круговорот, отличаются слабым уровнем загрязнения.

В отличие от окружающих кислых аллювиальных почв, почвы на техногенных илах

характеризуются слабощелочной реакцией в органоминеральных горизонтах, щелочной – в нижних слоях профиля.

В процессе преобразования техногенных илов наблюдается массовое развитие водорослей и ЦБ, чётко дифференцированное в зависимости от горизонтов по видовому и количественному представительству. Видовой состав альгофлоры верхних горизонтов формирующихся почв соответствует таковому в аллювиальных дерновых почвах окружающей территории.

Главные процессы, участвующие в формировании профиля – образование оторфованной подстилки, гумусообразование и оглеение – в течение нескольких десятилетий привели к образованию маломощной почвы, которая наследует свойства техногенных илов, но в то же время приобретает черты, присущие природным аллювиальным почвам.

Формирование почвенного покрова на техногенных отложениях в пойме следует рассматривать как положительное явление. Образовавшийся органоминеральный горизонт и растительный покров препятствуют активному размыву в паводок нижележащей неструктурной загрязнённой «надкорковой» илистой массы и растворению гипсовых новообразований – кор, сдерживающих подвижность мощной толщи загрязнённых техногенных отложений.

Автор благодарит своих коллег Г.Я. Кантора и А.П. Лемешко за помощь в отборе проб.

*Работа выполнена в рамках государственного задания Института биологии Коми НЦ УрО РАН по теме «Оценка и прогноз отсроченного техногенного воздействия на природные и трансформированные экосистемы подзоны южной тайги» № 0414-2018-0003.*

### Литература

1. Goryachkin S.V., Spiridonova I.A., Targulian V.O., Sedov S.N. Boreal soils on hard gypsum rocks: morphology, properties, and genesis // Eurasian Soil Science. 2003. V. 36. No. 7. P. 691–703.
2. География Кировской области. Атлас-книга / Под ред. Е.А. Колеватых, А.М. Прокашева, Г.А. Русских. Киров: Кировская областная типография, 2015. 80 с.
3. Дружинин Г.В., Лемешко А.П., Ворожцова Т.А., Синько В.В., Нечаев А.Н. Техногенные отложения озера Просного в системе водоотведения Кирово-Чепецкого химического комбината // Региональные и муниципальные проблемы природопользования: Матер. IX науч.-практ. конф. Киров–Кирово-Чепецк, 2006. С. 127–128.

4. Янин Е.П. Техногенные речные илы (условия формирования, вещественный состав, геохимические особенности). М.: НП «АПСО», 2018. 415 с.

5. Capra G.F., Ganga A., Grilli E., Vacca S., Buon-donno A. A review on anthropogenic soils from a worldwide perspective // J. Soils Sediments. 2015. V. 15. P. 1602–1618. doi: 10.1007/s11368-015-1110-x.

6. IUSS Working Group WRB 2015 World reference base for soil resources 2014. International soil classification system for naming soils and creating legends for soil maps. World soil resources reports. No. 106. FAO, Rome.

7. Ревич Б.А., Сагит Ю.Е., Смирнова Р.С., Сорокина Е.П. Методические рекомендации по геохимической оценке загрязнения территорий городов химическими элементами. М.: ИМГРЭ, 1982. 112 с.

8. Дабах Е.В. Микроэлементы в почвах, сформировавшихся на техногенных отложениях в районе предприятий холдинга «Уралхим» // Биогеохимия и биохимия микроэлементов в условиях техногенеза биосферы: Материалы VIII биогеохимической школы, посвященной 150-летию со дня рождения академика В.И. Вернадского. Гродненский государственный университет / Отв. ред. В.В. Ермаков. М.: ГЕОХИ РАН, 2013. С. 352–353.

9. Минкина Т.М., Мотузова Г.В., Назаренко О.Г. Состав соединений тяжелых металлов в почвах. Ростов-на-Дону: Изд-во «Эверест», 2009. 208 с.

10. Кабата-Пендиас А., Пендиас Х. Микроэлементы в почвах и растениях. М.: Мир, 1989. 439 с.

11. Дабах Е.В. Редкоземельные элементы в почвах на техногенных отложениях // Биодиагностика состояния природных и природно-техногенных систем: Материалы XV Всероссийской научно-практической конференции с международным участием. Книга 2. Киров: ВятГУ, 2017. С. 137–140.

12. Дабах Е.В., Кантор Г.Я., Лемешко А.П. Состояние почв в зоне влияния Кирово-Чепецкого химического комбината // Современные проблемы загрязнения почв: Матер. III междунар. конф. М., 2010. С. 80–84.

13. Водяницкий Ю.Н., Рогова О.Б. Биогеохимия лантаноидов в почвах // Бюллетень Почвенного института им. В.В. Докучаева. 2016. Вып. 84. С. 101–118.

14. Домрачева Л.И., Кондакова Л.В., Дабах Е.В., Елькина Т.С. Структурные особенности альгогруппировок на начальных этапах формирования почв на техногенных илах. Водоросли в эволюции биосферы // Материалы 1 палеоальгологической конференции. Москва, ПИН РАН. 2013. 158 с.

15. Кондакова Л.В., Дабах Е.В. Альгосинусии пойменных лугов на техногенной территории // Теоретическая и прикладная экология. 2017. № 3. С. 73–84.

### References

1. Goryachkin S.V., Spiridonova I.A., Targulian V.O., Sedov S.N. Boreal soils on hard gypsum rocks: morphology,

- properties, and genesis // Eurasian Soil Science. 2003. V. 36. No. 7. P. 691–703.
2. Geography of Kirov Region. Atlas book / Eds. E.A. Kolevatykh, A.M. Prokashchev, G.A. Russkikh. Kirov: Kirovskaya oblastnaya tipografiya, 2015. 80 p.
3. Druzhinin G.V., Lemeshko A.P., Vorozhtsova T.A., Sinko V.V., Nechayev A.N. Technogenic sediments of the Prosnoye Lake in then drainage system of Kirovo-Chepetsk chemical plant // Regionalnyye i munitsipalnyye problemy prirodopolzovaniya: Mater. IX nauch.-prakt. konf. Kirov – Kirovo-Chepetsk, 2006. P. 127–128 (in Russian).
4. Yanin E.P. Technogenic river silt (formation conditions, material composition, geochemical features). Moskva: NP «ARSO», 2018. 415 p. (in Russian).
5. Capra G.F., Ganga A., Grilli E., Vacca S., Bondonno A. A review on anthropogenic soils from a worldwide perspective // J. Soils Sediments. 2015. V. 15. P. 1602–1618.
6. IUSS Working Group WRB 2015. World reference base for soil resources 2014. International soil classification system for naming soils and creating legends for soil maps. World soil resources reports. No. 106. FAO, Rome.
7. Revich B.A., Sayet Yu.E., Smirnova R.S., Sorokina E.P. Methodical recommendations on the geochemical assessment of urban pollution by chemical elements. Moskva: IMGRE, 1982. 112 p. (in Russian).
8. Dabakh E.V. Microelements in soils formed on anthropogenic sediments in the area of the holding company «Uralkhim» // Biogekhimiya i biokhimiya mikroelementov v usloviyakh tekhnogeneza biosfery: Materialy VIII biogekhimicheskoy shkoly, posvyashchennoy 150-letiyu so dnya rozhdeniya akademika V.I. Vernadskogo. Grodno State University (Republic of Belarus) / Ed. V.V. Yermakov. Moskva: GEOKhI RAN, 2013. P. 352–353 (in Russian).
9. Minkina T.M., Motuzova G.V., Nazarenko O.G. Composition of heavy metal compounds in soils. Rostov-na-Donu: Everest, 2009. 208 p. (in Russian).
10. Kabata-Pendias A., Pendias Kh. Microelements in soils and plants. Moskva: Mir, 1989. 439 p. (in Russian).
11. Dabakh E.V. Rare earth elements in soils on technogenic sediments // Biodiagnostika sostoyaniya prirodnikh i prorodno-tekhnogennykh sistem: materialy XV Vserossiyskoy nauchno-prakticheskoy konferentsii s mezhdunarodnym uchastiyem. Kniga 2. Kirov: VyatGU, 2017. P. 137–140 (in Russian).
12. Dabakh E.V., Kantor G.Ya., Lemeshko A.P. Soil condition in the impact zone of the Kirovo-Chepetsk chemical plant // Modern problems of soil contamination: Mater. III mezhdunar. konf. Moskva, 2010. P. 80–84 (in Russian).
13. Vodyanitskiy Yu.N., Rogova O.B. Biogeochemistry of lanthanides in soils // Bulletin Pochvennogo instituta im. V.V. Dokuchayeva, 2016. V. 84. P. 101–118 (in Russian).
14. Domracheva L.I., Kondakova L.V., Dabakh E.V., Yelkina T.S. Structural features of algological associations at the initial stages of soil formation on technogenic silts. Algae in the evolution of the biosphere // Materialy I paleoalgologicheskoy konferentsii. Moskva, PIN RAN. 2013. 158 p. (in Russian).
15. Kondakova L.V., Dabakh E.V. Algosinusia of floodplain meadows on the technogenic territory // Theoretical and Applied Ecology. 2017. No. 3. P. 73–84. (in Russian).

**Влияние содержания тяжёлых металлов в воде малых рек, используемой для полива кукурузы армянской популяции**

© 2018. А. Р. Сукиасян, к. б. н., доцент,  
 Национальный политехнический университет Армении,  
 0009, Армения, г. Ереван, ул. Терьяна, д. 105,  
 e-mail: sukiasyan.astghik@gmail.com

Экологическая безопасность малых рек для населения региона, их роль в формировании биоты во многом определяются химическим составом воды. При изменении интенсивности действия климатических и антропогенных факторов химический состав и, как следствие, качество воды могут существенно изменяться. В связи с этим проведение мониторинговых исследований состава воды этих источников представляется весьма актуальным. Изучены особенности миграции ряда тяжёлых металлов (ТМ) в триаде вода-почва-растение на примере однолетнего травянистого культурного растения – сахарной кукурузы, произрастающего на прибрежных территориях реки Шнох. В качестве контрольного растения использовалась кукуруза инбредной линии В73. В специально оборудованной системой кондиционирования климатической комнате моделировали засуху изменением оптимальной относительной влажности почвы опытных вазонов. В контрольных вазонах оптимальная относительная влажность почвы (ОВП) составляла 54%, в случае умеренной засухи – 43%, при этом визуально не наблюдалось увядания листьев растения. Во время моделирования сильной засухи оптимальная относительная влажность почвы составляла 34%, а увядание листьев наблюдалось в течение дня. Содержание ТМ в образцах речной воды, прибрежной почвы и зёрен растений осуществлялось с помощью портативного анализатора «Thermo Scientific™ Niton™ XRF PortableAnalyser». Проведён анализ кинетических данных роста растения в условиях моделируемой засухи. Определены кинетические параметры роста растений в трёх условиях моделируемой засухи. Установлена корреляционная связь между скоростью роста биологических образцов и засухой, кинетические параметры роста растений в условиях моделируемой засухи. Выявлена корреляционная связь между величиной водного потенциала и осмотического давления у трёхдневных побегов пятого листа кукурузы в условиях засухи. Рассмотрен физиологический ответ роста растения по степени засухи, показателям водного потенциала и осмотического давления. Выявлена определённая пространственная динамика распределения некоторых ТМ в триаде вода-почва-растение. Полученный экспериментальный материал позволяет осуществить комплекс мероприятий по мониторингу степени загрязнённости речной воды, которую используют в оросительных целях с учётом почвенно-климатических условий произрастания.

*Ключевые слова:* растение, засуха, кинетика роста, водный потенциал, осмотическое давление, тяжёлые металлы.

**Influence of heavy metals content in water of small rivers used for irrigation of maize of Armenian population**

© 2018. A. R. Sukiasyan ORCID: 0000-0001-5549-3146  
 National Polytechnic University of Armenia,  
 105, Teryan St., Armenia, Yerevan, 0009,  
 e-mail: sukiasyan.astghik@gmail.com

Ecological safety of small rivers for the population of the region, their role in the formation of biota is largely determined by the chemical composition of water. The intensity of climatic and anthropogenic factors changes, the chemical composition and, as a consequence, the quality of water can be vary significantly. In this regard, the monitoring studies of the water composition of these sources are very relevant. The features of migration of a number of heavy metals (HM) in the water-soil-plant triad were studied using the example of an annual herbaceous cultural plant – sugar corn (*Zea mays* L.) growing on the coastal areas of the Shnogh River. As a control plant corn inbred line B73 was used. With a specially equipped air-conditioning system the drought was modeled in climatic room by changing the optimum soil water content in the experimental vases. In the control vases, the optimum soil water content was 54%, in the case of a mild drought – 43%, wherein the wilting of leaves of the plant was not visually observed. During the modeling of severe drought, the optimum soil water content was 34%, and leaf wilting was observed during one day. The content of HM in samples of river water, coastal soil and plant grains were carried out using a portable analyzer “Thermo Scientific™ Niton™ XRF Portable Analyzer. An analysis of the kinetic data of plant growth under simulated drought conditions was carried out. Kinetic parameters of plant growth in three conditions of simulated drought were determined. A correlation was established between the growth rate of biological samples and the drought. The kinetic parameters of plant growth under simulated drought conditions were established. A correlation was found between the water potential and osmotic

pressure in the three-day shoots of the fifth maize sheet under conditions of drought. The physiological response of plant growth according to the degree of drought and indicators of water potential and osmotic pressure were considered. A certain spatial dynamics of distribution of some HM in the water-soil-plant triad is revealed. The obtained experimental material will makes it possible to carry out a complex of measures to monitor the degree of contamination of river water which used for irrigation purposes taking into account soil and climatic conditions of growth.

**Keywords:** plant, drought, growth kinetics, water potential, osmotic pressure, heavy metals.

Объекты промышленной разработки различных рудных полезных ископаемых являются источниками основного поступления тонкодисперсных минеральных частиц и негативного влияния на окружающую среду. Установлена закономерность в характере распределения содержания ряда элементов, которая выражается в чётко выраженном увеличении концентраций W, Mo и Zn. Не является исключением и Техутское молибденовое месторождение, в связи с эксплуатацией которого химический состав воды реки Шнох претерпел изменения, что отразилось на ландшафте и запасах пресной воды. Река Шнох принадлежит бассейну реки Дебет и её воды используются для орошения близлежащих земель населённых пунктов Техут и Шнох. С одной стороны, неблагоприятные условия окружающей среды накладывают серьёзные ограничения на рост растений, традиционно выращиваемых на данной территории [1], с другой – абиотический стресс засухи ограничивает рост растения, снижая уровень продуктивности сельскохозяйственных растений в странах с сухим континентальным климатом [2]. На территории Армении сахарная кукуруза является характерным приусадебным культурным растением. В большей степени она культивируется в северных регионах вблизи береговых линий рек. Кукуруза отличается высокой приспособляемостью к климатическим изменениям, о чём свидетельствует рост урожайности и увеличение её посевных площадей в мире. За последние три года мировое производство зерна кукурузы достигло 638 млн тонн [3].

Приоритетными являются исследования, направленные на изыскание сортов растений с повышенной адаптивной способностью к меняющимся условиям окружающей среды [2]. Временный дефицит воды, возникающий на разных фазах развития растений, серьёзно влияет на их рост, поэтому весьма актуально изучение ответной реакции растений на засуху [4]. Изменение кинетики роста растения является частью его реакции при засухе [5]. Небольшие листья теряют меньше воды из-за уменьшенной площади транспирации. Очевидно, что изменение количества воды на

любой стадии развития кукурузы может отразиться на её урожайности.

Исходя из вышесказанного, целью работы является оценка влияния загрязнённости речной воды на рост растений с учётом абиотического стресса – засухи, что позволяет статистически достоверно изучать процессы адаптации растения при различных уровнях засухи.

## Объекты и методы исследования

В качестве объекта исследований были выбраны сорта армянской популяции однолетнего травянистого культурного растения – сахарной кукурузы (*Zea mays* L.), распространённой в Лорийском районе Армении вблизи реки Дебет (Шнох – 41°08'52" с. ш., 44°50'16" в. д., Техут – 41°07'05" с. ш., 44°50'45" в. д.) и кукурузы В73 (Iowa Stif Stalk Synthetic) в качестве биологического контроля. Моделирование абиотической засухи осуществлялось в специально оборудованной системе кондиционирования климатической комнате. В контрольных вазонах оптимальная относительная влажность почвы (ОВП) составляла 54%. Моделирование засухи осуществлялось путём изменения ОВП режимом полива. В случае умеренной засухи ОВП составляла 43%, при этом визуально не наблюдалось увядания листьев растения. Во время моделирования сильной засухи ОВП составляла 34%, и наблюдалось увядание листьев в течение дня [6]. В экспериментах использовалась почва фирмы Jiffy (Нидерланды). Измерения содержания химических элементов в исследуемых образцах (зола семян кукурузы, вода и почва) осуществлялись с помощью портативного анализатора «Thermo Scientific™ Niton™ XRF Portable Analyser» [7].

Статистическую обработку выполняли на основе 10 биологических и до 5 технических повторностей экспериментов при  $p < 0,05$  [8].

## Результаты и их обсуждение

В проведённых нами ранее исследованиях были изучены физиологические изменения роста кукурузы, которые вызывала засуха. Осуществлённая моделируемая засуха из-

менила значение степени удлинения листа (СУЛ), сохраняя при этом общую кинетическую закономерность роста растения. Изучение кинетических параметров роста растений в условиях моделируемой засухи позволило обнаружить корреляционную связь между скоростью роста биологических образцов и засухой. При этом адаптационные механизмы растений регулируют вызванные изменения путём ограничения потери воды с поверхности листьев. Было показано, что величина транспирации может быть использована в качестве критерия при оценке влияния абиотического стресса на ряд физиологических показателей роста растения [9]. При этом необходимо учитывать достигаемость корневой системы кукурузы до уровня грунтовых вод, сопоставляя удалённость самого растения от основного русла реки [10]. Естественно, можно предположить, что осмотически устойчивые растения будут более толерантны к различным экологическим стрессам, приводящим к водному дефициту растений. Определение величины тургора имеет большое значение, в частности, для экологических исследований: его определение позволяет судить о максимальной способности растения поглощать воду из почвы и удерживать её в условиях абиотического стресса [11]. Водный потенциал клеток изменяется также в присутствии органических веществ, связывающих воду [12].

Об изменении динамики роста растения в условиях засухи можно судить по коэффициентам связи уравнения  $y = a_0 + a_1x + a_2x^2$  [9]. Согласно полученным результатам, значение

нулевого полиномиального коэффициента, определяющего начальную скорость прорастания 5-го листа растения, отличается от контрольного значения при умеренной засухе в два раза, а при сильной засухе – в три раза соответственно. Количественные изменения первого полиномиального коэффициента составило 79% при сравнении с контрольным образцом В73 в тех же условиях и 23% – в случае сильного стресса (табл. 1).

Исходя из того, что тепловой стресс вызывает изменения в обмене веществ клеточной стенки, тем самым являясь важным физиологическим механизмом проявления толерантности растений, в дальнейших экспериментах были исследованы изменения водного потенциала и осмотического давления у трёхдневных побегов пятого листа кукурузы в условиях засухи. В проведённых экспериментах сильная засуха способствует повышению значения водного потенциала растительной клетки на 79% (табл. 2), что может быть связано с клеточным расширением, обеспечивающим адаптацию растения при засухе [13].

Реакция растения в ответ на воздействие засухи определяется функциональными возможностями его клеточной стенки. В течение периода повышенной температуры в клеточной стенке растения создаётся вторичное осажение, прекращающее удлинение клеток. После воздействия высокой температуры эти белки обеспечивают укрепление клеточной стенки, помогая растению адаптироваться к высокой температуре. Поэтому клеточные стенки с повышенным уровнем расширения

Таблица 1 / Table 1

Коэффициенты полиномиальной связи для описания кинетики роста сахарной кукурузы при засухе  
Relationship between polynomial coefficients for describing the growth kinetics of *Zea mays* L. under drought

Образец / Sample		Шнох Shnogh	Техут Tekhut	В 73
$a_0$ – нулевой полиномиальный коэффициент the zero polynomial coefficient	1	39,77	31,45	20,04
	2	82,19	55,77	44,62
	3	126,0	116,6	116,6
$a_1$ – первый полиномиальный коэффициент the first polynomial coefficient	1	72,15	112,1	108,4
	2	51,32	92,04	87,00
	3	9,53	28,47	28,47
$R^2$ – коэффициент аппроксимации the coefficient of approximation	1	0,997	0,996	0,993
	2	0,999	0,998	0,991
	3	0,9	0,9	0,9

Примечание: 1 – контроль (относительная влажность почвы – 54%); 2 – умеренная стресс-засуха (относительная влажность почвы – 43%); 3 – сильная стресс-засуха (относительная влажность почвы – 34%).

Note: 1 – Control (Soil Water Content – 54%); 2 – Mild stress (Soil Water Content – 43%); 3 – Severe stress (Soil Water Content – 34%).

Таблица 2 / Table 2

Изменение потенциометрических параметров пятого листа сахарной кукурузы при моделируемой засухе  
Variation in the potentiometric parameters of the fifth leaf of *Zea mays* L. under simulated drought

Образец Sample	Водный потенциал, МПа Waterpotential, MPa	Осмотическое давление, МПа Osmoticpotential, MPa
Контроль (относительная влажность почвы – 54%) Control (Soil Water Content – 54%)		
Шнох / Shnogh	-0,312	-0,175
Техут / Tekhut	-0,245	-0,393
В 73	-0,09	-0,273
Умеренный стресс (относительная влажность почвы – 43%) Mild stress (Soil Water Content – 43%)		
Шнох / Shnogh	-0,313	-0,169
Техут / Tekhut	-0,256	-0,45
В 73	-2,51	-3,01
Сильный стресс (относительная влажность почвы – 34%) Severe stress (Soil Water Content – 34%)		
Шнох / Shnogh	-0,09	-0,161
Техут / Tekhut	-0,112	-0,229
В 73	-2,27	-2,39

ослабляются, становятся более эластичными, сохраняя клеточные функции во время теплового стресса, а засуха может стать посредником при метаболических изменениях клеточной стенки, изменяя синтез лигнина [13, 14].

Определение значения осмотического давления внесло некоторое пояснение в поведении клеток при засухе. Величина осмотического давления показывает возможности растительной клетки поглощать воду. Поток воды через клеточную оболочку увеличивает в ней гидростатическое давление, которое и растягивает саму оболочку, тем самым обеспечивая необходимый водный запас клетки. Но при растягивании сама клеточная оболочка оказывает противодействие (водный потенциал), регулирующее количество необходимой воды, поступившей в клетку [14].

В результате разработки Техутского молибденового месторождения в речной воде Шноха отмечается увеличение загрязнителей, которые содержат соединения тяжёлых металлов (ТМ), делая воду непригодной для использования в оросительных целях. В процессе адаптации растения, особенно в условиях засухи, не последнюю роль играют концентрационные изменения ТМ в среде [15]. Данные химические соединения, попадая в почву, претерпевают ряд превращений, рассеиваются или накапливаются в зависимости от характера геохимических барьеров, свойственных данной территории и определяющих их миграцию по основным составляющим биоты с дальнейшим попаданием в организм человека [16]. В последующей

серии экспериментов определяли значение концентрации некоторых опасных микроэлементов в триаде вода-почва-растение в период созревания растений, которые орошались водами бассейна реки Шнох (табл. 3).

Содержание молибдена и вольфрама в образцах воды из Техута, используемых в оросительных целях для растений, произрастающих в прибрежной зоне бассейна реки Шнох, оказалось наиболее высоким по сравнению с другими микроэлементами As, Pb, Zn и Cu. Образцы оросительной воды из реки Шнох содержали невысокие концентрационные значения ТМ, за исключением цинка. Общая картина по содержанию данных химических элементов в пробах береговых почв произрастания кукурузы сохранилась в неизменности, за исключением содержания вольфрама. Концентрация данного химического элемента снизилась почти на порядок.

В следующей экспериментальной серии измерялись концентрации исследуемых микроэлементов в спелых зёрнах кукурузы. В этом случае для сравнительного анализа в качестве биологического контроля использовалась кукуруза инбредной линии В73. В процессе исследований было установлено, что сахарная кукуруза обладает избирательной накопительной активностью данных ТМ. Содержание Mo, As, Pb в образцах растений из двух регионов были зафиксированы на уровне их содержания в контрольном экземпляре. Иначе обстоит дело с цинком медью и вольфрамом. Содержание Zn было выше по сравнению

Таблица 3 / Table 3

Содержание некоторых тяжёлых металлов и мышьяка в триаде «вода-почва-растение»  
Content of some heavy metals and arsenic in the triad "water-soil-plant"

Тяжёлые металлы / металлоид Heavy metals / metalloid	Mo	As	Pb	W	Zn	Cu
Содержание тяжёлых металлов и мышьяка в оросительной воде, мг/л The content of heavy metal sand arsenic in irrigation water, mg/L						
Шнох / Shnogh	0,035	0,019	0,030	0,459	0,837	0,255
Техут / Tekhut	2,421	0,175	0,403	2,162	0,384	0,684
Содержание тяжёлых металлов и мышьяка в почве, мг/г The content of heavy metals and arsenic in soil, mg/g						
Шнох / Shnogh	0,004	0,045	0,074	0,039	0,255	0,630
Техут / Tekhut	0,002	0,010	0,012	0,020	0,054	0,048
Содержание тяжёлых металлов и мышьяка в зерне кукурузы, мг/г The content of heavy metals and arsenic in corn of maize, mg/g						
Шнох / Shnogh	0,071	0,047	0,006	0,149	2,629	0,365
Техут / Tekhut	0,036	0,010	0,011	0,013	1,301	0,239
В73	0,051	0,027	0,180	0,727	1,980	0,552

с В73 в образцах растений из Техута на 34% и Шноха на 74%. Концентрация меди была ниже по сравнению с В73 только в образцах зёрен кукурузы из Техута на 57% и Шноха на 87%. В остальных рассматриваемых случаях уровень содержания W был ниже в растительных образцах, выращенных в Техуте, на 81%, и в Шнохе – почти на порядок.

При интоксикации отмечается предотвращение возникновения стресса путём ограниченного поглощения элемента из почвы корневой системой растения [17]. Работа таких адаптационных механизмов достигается процессами иммобилизации металлов в комплексообразовании с помощью органических соединений [18]. В случае драматического развития данного сценария, если ТМ удаётся проникнуть в растительные ткани, то растением активируются механизмы детоксикации, сущность которых заключается в обособлении ТМ в различных внутриклеточных отсеках (например, вакуоли) [19, 20]. С другой стороны, как только ТМ удаётся преодолеть биофизический барьер и ионы металлов входят в ткани и клетки, растение начинает активировать другие механизмы клеточной защиты, чтобы свести на нет и уменьшить неблагоприятные последствия воздействия ТМ. Очевидно, что, по сути, включение любых из этих механизмов и биомолекул предопределяется видом растения и степенью его толерантности к ТМ [21].

### Заключение

В зависимости от содержания влаги в почве именно количество поступившей в

клетку воды отражается на физиологическом уровне, регулируя рост и развитие растения при стресс-засухе. Расширение клеточной оболочки контролируется разницей между водным потенциалом и осмотическим давлением, вызывая упругие деформации растительной клетки при адаптации во время засухи. При этом на произрастание кукурузы определённую избирательность оказывает химический состав речной воды и содержание в ней некоторых ТМ. Полученный экспериментальный материал по миграции ТМ в триаде вода-почва-растение позволяет осуществить комплекс мероприятий по контролю и снижению степени загрязнённости речной воды, которую используют в оросительных целях.

### References

- Ingram J., Bartels D. The molecular basis of dehydration tolerance in plants // *Annual Review of Plant Physiology and Plant Molecular Biology*. 1996. V. 47. P. 377–403. doi 10.1146/annurev.arplant.47.1.377.
- Bray E.A., Bailey-Serres J., Weretilnyk E. Responses to abiotic stresses // *Biochemistry and Molecular Biology of Plants*. American Society of Plant Physiologists, Rockville, MD. 2000. P. 1158–1249.
- Food security in the 2030 Agenda for Sustainable Development [Internet resource] <http://faostat.fao.org/site/567/default.aspx> (Accessed: 25.09.2015).
- Sukiasyan A.R. Regulation of water balance of the plant from the different geo environmental locations // *World Academy of Science, Engineering and Technology, International Journal of Environmental, Chemical, Ecological, Geological and Geophysical Engineering*. 2016. V. 10. No. 8. P. 895–898. urn:dai:10.1999/1307-6892/10005669.

5. Boyer J.S. Plant productivity and environment // Science. 1982. V. 218. P. 443–448. doi 10.1126/science.218.4571.443
6. Sukiasyan A.R., Tadevosyan A.V., Simonyan G.S., Pirumyan G.P. The influence of abiotic stress on the growth of plants // Uspekhi sovremennogo estestvoznaniya. 2016. No. 7. P. 168–172 (in Russian).
7. Sukiasyan A.R. Antioxidant capacity of maize corn under drought stress from the different zones of growing // International Journal of Biological, Biomolecular, Agricultural, Food and Biotechnological Engineering. 2016. V. 10. No. 8. P. 413–416. doi: 10.1999/1307-6892/10005083.
8. Kirakosyan A.A., Sukiasyan A.R. Using MATLAB as an express method for estimating experimental results // Information technology: Mezhd. molodezhnaya konf. Yerevan, Armenia, 2005. P. 34–37 (in Russian).
9. Sukiasyan A.R., Tadevosyan A.V., Nagdalyan A.G., Baghdasaryan S.S. Transpiration as a criterion for assessing abiotic stress // Vestnik natsionalnogo politekhnicheskogo universiteta Armenii: Gidrologiya i gidrotekhnika. 2015. No. 2. P. 9–14 (in Russian).
10. Mkrtychyan S.M., Avakyan A.P. Regularities of the influence of the depth of groundwater on the productivity of agricultural crops of wetlands of the Gegharkunik marz // Izvestiya Natsionalnogo agrarnogo universiteta Armenii. 2009. No. 2. P. 86–90 (in Russian).
11. Ilyin V.B. Heavy metals in the soil plant system. Novosibirsk: Nauka, Sibirskoye otdeleniye. 1991. 151 p. (in Russian).
12. Blokhina O., Virolainen E., Fagerstedt K.V. Antioxidants, oxidative damage and oxygen deprivation stress: a review // Annals Botany. 2003. V. 91. P. 179–194.
13. Xu Q., Xu X., Shi Ya., Xu J., Huang B. Transgenic tobacco plants overexpressing a grass PpEXP1 gene exhibit enhanced tolerance to heat stress // PLoS One. 2014. V. 9. P. e100792. doi: 10.1371/journal.pone.0100792.
14. Lima R.B., dos Santos T.B., Vieira L.G., Ferrarese M. de L., Ferrarese-Filho O., Donatti L., Boeger M.R., Petkowicz C.L. Heat stress causes alterations in the cell wall polymers and anatomy of coffee leaves (*Coffea arabica* L.) // Carbohydrate Polymers. 2013. V. 93. P. 135–143. doi: 10.1016/j.carbpol.2012.05.015.
15. Moussa H.R., Abdel Aziz S.M. Comparative response of drought tolerant and drought sensitive maize genotypes to water stress // Australian Journal of Crop Science. 2008. No. 1. P. 31–36.
16. Sharp R.E., Poroyko V., Hejlek L.G., Spollen W.G., Springer G.K., Bohnert H.J., Nguyen H.T. Root growth maintenance during water deficits: physiology to function algenomics // Journal of Experimental Botany. 2004. V. 55. P. 2343–2351. doi: 10.1093/jxb/erh276.
17. Patra M., Bhowmik N., Bandopadhyay B., Sharma A. Comparison of mercury, lead and arsenic with respect to genotoxic effects on plant systems and the development of genetic tolerance // Environmental and Experimental Botany. 2004. V. 52. No. 3. P. 199–223. doi:10.1016/j.envexpbot.2004.02.009.
18. Manara A. Plant responses to heavy metal toxicity // Plants and heavy metals / Ed. A. Furini. Springer, Dordrecht, Netherlands. 2012. P. 27–53. doi: 10.1007/978-94-007-4441-7\_2.
19. Dalvi A., Bhalerao S.A. Response of plants towards heavy metal toxicity: an overview of avoidance, tolerance and uptake mechanism // Annals of Plant Sciences. 2013. V. 2. No. 9. P. 362–368. http://dx.doi.org/10.1155/2015/756120.
20. Viehweger K. How plants cope with heavy metals // Botanical Studies. 2014. V. 55. No. 35. P. 1–12. doi: 10.1186/1999-3110-55-35
21. Sukiasyan A., Kirakosyan A., Tadevosyan A., Aslikyan M., Gharajyan K. Peculiarities of accumulation of some heavy metals on the chain of water soil plant // International Journal of Advanced Engineering and Management Research. 2017. V. 2. No. 5. P. 1534–1541.

## Assessment of the state of soils in specially protected natural reservations of the Kirov region

© 2018. Т. А. Adamovich<sup>1</sup> ORCID: 0000-0002-8684-927X,

Е. В. Tovstik<sup>1</sup> ORCID: 0000-0003-1861-6076, Е. С. Soloveva<sup>1</sup> ORCID: 0000-0001-9222-7752,

Т. Я. Ashikhmina<sup>1,2</sup> ORCID: 0000-0003-4919-0047, Г. И. Berezin<sup>1</sup> ORCID: 0000-0002-0603-0652,

А. М. Prokashev<sup>1</sup> ORCID: 0000-0002-3029-8093, В. П. Savinykh<sup>1,3</sup> ORCID: 0000-0002-3259-6721,

<sup>1</sup>Vyatka State University,

36, Moskovskaya St., Kirov, Russia, 610000,

<sup>2</sup>Institute of Biology of Komi Scientific Centre of the Ural Branch

of the Russian Academy of Sciences,

28, Kommunisticheskaya St., Syktyvkar, Komi Republic, Russia, 167982,

<sup>3</sup>Moscow State University of Geodesy and Cartography,

4, Gorokhovskiy Pereulok, Moscow, Russia, 105064,

e-mail: ttjnadamvich@rambler.ru

The assessment of the state of the specially protected natural areas (SPNA) of the regional (the “Pizhensky” zakaznik) and of the federal significance (the “Nurgush” nature reserve) located in the Kirov region is given in the article. The predominant type of soils of the SPNRs under the study is alluvial turf soils, with strongly and slightly acidic reaction of the medium. The content of organic matter in the soils of the “Pizhensky” zakaznik varies from 3.1 to 4.7% for meadow and from 1.2 to 7.3% for forest phytocenoses. For the territory of the “Nurgush” nature reserve the content of organic matter in the soils of forest phytocenoses ranges from 2.0 to 6.7%. The content of nitrate nitrogen in the soils of the studied SPNR corresponds to the average level of soil supply with nitrogen. A decrease in the content of ammonium nitrogen down the soil profile was noted for the studied sites. The content in the soils of heavy metals (Zn, Mn, Fe, Cu, Pb, Cd) is at a stable level within the ecological norm. In all studied soil samples, the main content of metals was manganese and iron, both for active and for gross form. The maximum content of active forms of manganese and iron is found in soil samples of the upper horizons. Insignificant amounts of copper, lead and cadmium indicate the absence of man-caused contamination of the soil in these sites. Among the gross forms of heavy metals, iron predomination in soil samples of the upper and lower horizons was recorded. The maximum content of gross iron form was noted in the samples from the territory of the “Nurgush” nature reserve.

**Keywords:** the Kirov Region, the “Pizhensky” zakaznik, the “Nurgush” nature reserve, soils, agrochemical properties, heavy metals, ecosystem.

## Оценка состояния почв особо охраняемых природных территорий Кировской области

© 2018. Т. А. Адамович<sup>1</sup>, к. т. н., доцент,

Е. В. Товстик<sup>1</sup>, к. б. н., доцент, Е. С. Соловьёва<sup>1</sup>, к. б. н., доцент,

Т. Я. Ашихмина<sup>1,2</sup>, д. т. н., профессор, зав. лабораторией,

Г. И. Березин<sup>1</sup>, к. б. н., доцент,

А. М. Прокашев<sup>1</sup>, д. с.-х. н., профессор,

В. П. Савиных<sup>1,3</sup>, д. т. н., профессор, член-корреспондент РАН,

<sup>1</sup>Вятский государственный университет,  
610000, Россия, Киров, ул. Московская, 36,

<sup>2</sup>Институт биологии Коми НЦ УрО РАН,  
167982, Россия, Республика Коми, Сыктывкар, ул. Коммунистическая, 28,

<sup>3</sup>Московский государственный университет геодезии и картографии,  
105064, Россия, Москва, Гороховский переулок, 4,

e-mail: ttjnadamvich@rambler.ru

Проведена оценка состояния особо охраняемых природных территорий (ООПТ) регионального – заказник «Пижемский» и федерального значения – заповедник «Нургуш», расположенных в Кировской области. Преобладающим типом почв исследуемых ООПТ является аллювиальные дерновые почвы, с сильно- и слабкокислой реакцией среды. Содержание органического вещества в почвах территории заказника «Пижемский» варьирует от 3,1 до 4,7% для луговых и от 1,2 до 7,3% для лесных фитоценозов. Для территории заповедника «Нургуш» содержание органического вещества в почвах лесных фитоценозов изменяется в интервале от 2,0 до 6,7%. Содержание нитратного азота в почвах исследуемых ООПТ соответствует среднему уровню обеспеченности почв азотом. Для исследуемых территорий отмечено снижение содержания аммонийного азота вниз по почвенному профилю. Содержание в почвах тяжёлых металлов (Zn, Mn, Fe, Cu, Pb, Cd) находится на стабильном уровне в пределах экологической нормы. Во всех изучаемых почвенных образцах основной вклад в содержание металлов вносят марганец и железо, как для подвижной, так и для валовой формы. Максимальное содержание подвижных форм марганца и железа установлено в образцах почв верхних горизонтов. Незначительные количества меди, свинца и кадмия свидетельствуют об отсутствии техногенного загрязнения почвы на этих участках. Среди валовых форм тяжёлых металлов отмечено преобладание железа в пробах почвы из верхнего и нижнего горизонтов. Максимальное содержание валовой формы железа было отмечено в образцах с территории заповедника «Нургуш».

**Ключевые слова:** Кировская область, заказник «Пижемский», заповедник «Нургуш», почвы, агрохимические свойства, тяжёлые металлы, экосистема.

The creation of specially protected natural areas (SPNA) is an effective measure to maintain the ecological balance of the territories, as well as the restoration of natural ecosystems. The main task of the existing SPNA is the preservation of biological and landscape diversity in all its forms. Currently, the total area of protected territories in the world is more than 4 million km<sup>2</sup>, of which Russian areas account for 1 million 950 thousand km<sup>2</sup>, which is 11.5% of the country's territory [1].

Despite the high value, SPNA can change under the influence of both anthropogenic and natural factors; the loss of their ecological significance is also possible [2]. To foresee negative changes and define environmental measures aimed at optimizing the state of protected reservations is possible through environmental monitoring of natural environments and objects.

The soil, among the objects of the natural environment, is of particular importance. As a complex polyfunctional natural system it has a significant impact on the Earth's ecosystems and the biosphere as a whole [3]. In relation to the environment the soil performs an important protective function. According to the modern ecological concept, pollution of the soil is any action that causes violation of its normal functioning. Soil contaminants can be any physical agents, chemicals in different aggregate states, biological species that enter the soil or appear in it in quantities that go beyond their background concentration. Concentrating on the surface of the soil all these can worsen the general properties of the soil [4].

Despite the exclusion of the possibility of direct contamination of the SPNA soil due to the absence of anthropogenic activity, indirect contamination due to the translocation of sub-

stances with air masses and with water during floods is possible.

The purpose of this work was to assess the state of the soils of the specially protected natural reservations of regional (the “Pizhemy” zakaznik) and of the federal significance (the “Nurgush” nature reserve) located in the Kirov region. In accordance with the Russian environmental legislation, “Nurgush” refers to the “zapovednik” type territories, and “Pizhemy” – to the “zakaznik” type.

Earlier researches of soils of studied SPNA were carried out mainly in the context of forest vegetation researches, botanical researches, as well as studies of invertebrate and vertebrate fauna [5]. The results of this work can be used in studying and assessing the degree of degradation of similar soils of cross-border areas. The obtained materials can serve as a basis for monitoring studies in the territories of the “Nurgush” nature reserve and the “Pizhemy” zakaznik.

## Objects and methods

The objects of the study were the soils of two nature protected areas located in the Kirov region: the “Pizhemy” zakaznik and the “Nurgush” nature reserve.

The state nature zakaznik (SNZ) “Pizhemy”, established to protect and restore aquatic biogeocenoses, is located on the lands of the Arbazhsky, Kotelnichsky, Pizhansky, Tuzhinsky and Sovetsky districts of the Kirov region. The territory of the reserve has an elongated form from the north-west to the south-east along the Pizhma River downstream with a turn to the south-east along the Nemda River, flowing into the Pizhma River. The area of the reserve is 30847.94 hectares. The most part of the reserve

Table 1

Characteristics of sampling sites and soil types (A1)

Protected territories	No. of sampling site	Type of phytocenosis	Type of soil
The “Pizhemsky” zakaznik	1	meadow	alluvial turf granular medium-loamy medium-humus
	4		
	2	forest	alluvial turf granular medium-loamy medium-humus
	3		alluvial turf granular heavy-loamy humus-rich dark-humus
	5		alluvial turf light-loamy medium-humus
	6		alluvial turf light-(medium)-loamy medium-humus
	7		alluvial turf sandy-loam low-humus
The “Nurgush” nature reserve	8	forest	alluvial turf
	9		
	10		

is located within the Kotelnichskaya lowland, which is a flat sandy lowland with a few shallow and low uplifts overlain by cover loams [6].

The state nature reserve (SNR) “Nurgush” is the only nature reserve in the territory of the Kirov region. It is located in the south-eastern part of the Kotelnichsky district. The reserve was created to protect the floodplain complexes of the Vyatka River – numerous lakes and coniferous-broadleaf forests. The territory of the reserve is composed of modern alluvial sediments. Soils are heterogeneous in the granulometric state. The predominant types of soils are alluvial turf soils [7].

Sampling of the soil for the research in the “Pizhemsky” zakaznik was carried out on sites located along the Pizhma River (No. 1, 4 – meadow, and 2, 3, 5, 6, 7 – forest phytocenoses) (Fig. 1, see color insert).

In the state reserve “Nurgush” sampling of the soil was carried out on the sites of forest phytocenoses located on the shores of lakes Chernoye, Nurgush, Krivoye (sites No.No. 8, 9, 10) (Fig. 2, see color insert).

Sampling was carried out from the upper horizons of the soil from a depth of 0–10; 10–25 cm, including the thickness of the sod in meadow and litter in forest phytocenoses in the summer period (2017 July–August). The description of sampling sites is presented in Table 1.

In the soil samples the reaction of soil extract was determined by a potentiometric method in accordance with GOST 26483-85; the content of organic matter – according to the Tyurin's method in the modification of CINA0; nitrate and ammonium nitrogen – by the method of CINA0; labile phosphorus – by Kirsanov's method in the modification of CINA0. The content of active and gross forms

of heavy metals was determined by the method of atomic absorption spectroscopy.

Statistical processing of the research results was carried out by standard statistical analysis methods using EXCEL.

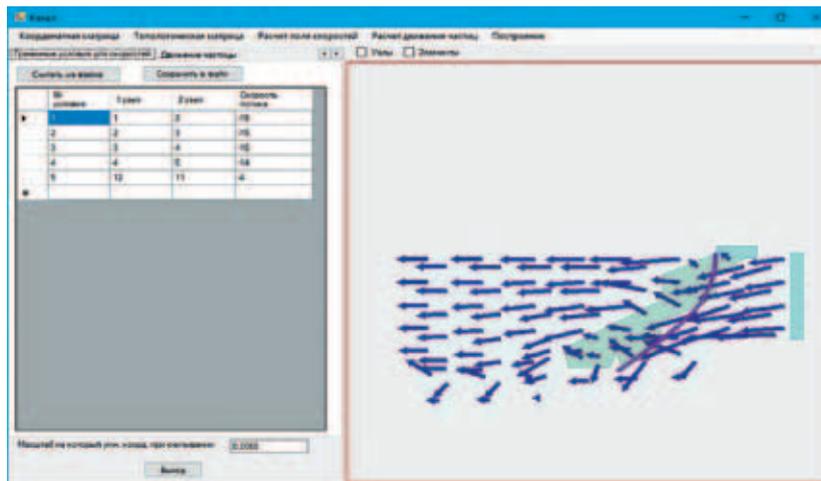
### Results of the study and their discussion

The study of the reaction of the soils extracts in the territory of the “Pizhemsky” reserve showed that the soils are slightly-, medium- and strongly acidic (Table 2). The values of exchange acidity in the experimental samples taken from the upper horizons of the soil (0–10 cm) varied from 5.0 to 5.5 for meadow and from 4.4 to 5.6 for forest phytocenoses.

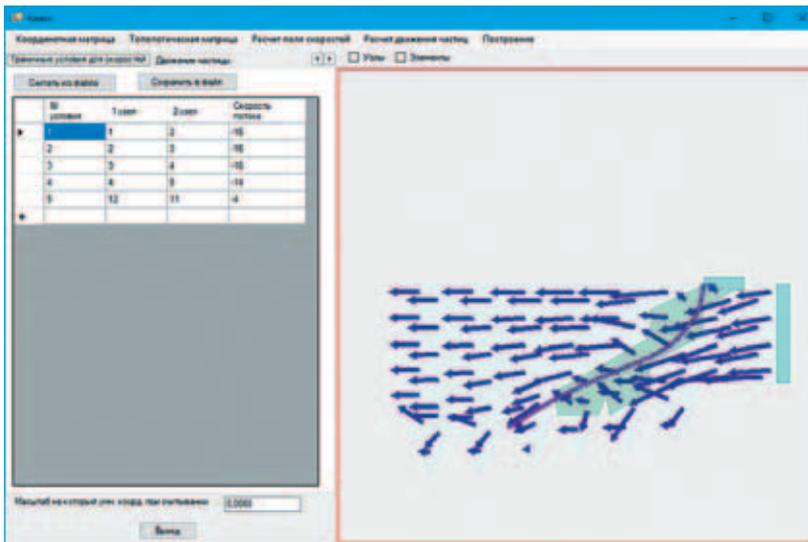
For most of the sites studied, there was observed a tendency to decrease acidity from the upper to the lower horizon, except for sites No. 1 and No. 7. In contrast to the territory of the “Pizhemsky” zakaznik, the soils of the territory of the “Nurgush” nature reserve are characterized by a more acid reaction of soil extract (4.1–4.9) and are strongly and slightly acidic. The determined values of exchange acidity for SPNA soils were characteristic of alluvial turf soils.

The content of organic matter in the samples taken from the upper horizons of the soils in the “Pizhemsky” zakaznik was higher in forest (11.9–21.3) than meadow (9.3–11.5) phytocenoses, which is associated with higher incidence of plant litter in forest than meadow phytocenoses. It is known that in forest litter the accumulation of biogenic carbon can reach 43% of the mass [8]. In comparison with the upper horizon, the soils of the lower horizon were characterized by a lower content of organic matter. The determined values of organic matter content in the

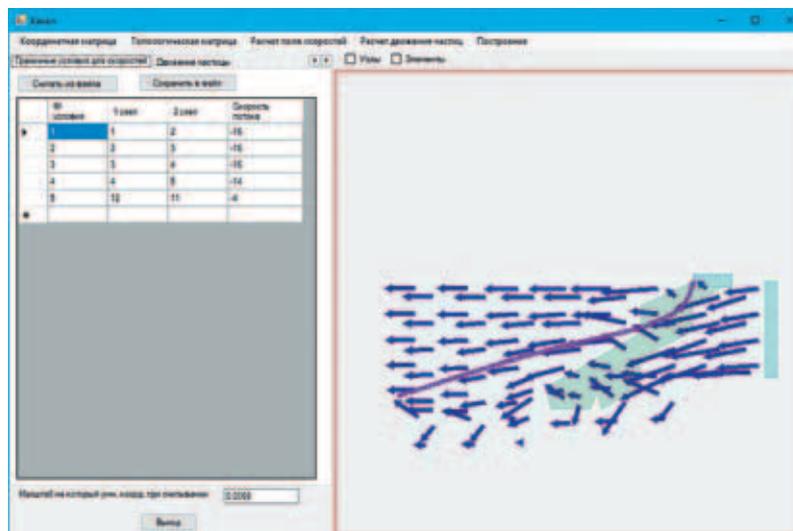
а



б



в



**Рис. 3.** Результат расчёта поля скоростей и траектории частицы, которая вводится с вертикальной скоростью 1 м/с вниз в двенадцатом узле и имеет критическую скорость витания:  
 а)  $v_{кр} = 8,46$  м/с; б)  $v_{кр} = 6,5$  м/с; в)  $v_{кр} = 5$  м/с  
**Fig. 3.** The result of the calculation of the velocity field and the particle trajectory, which is introduced with a vertical velocity of 1 m/s down in the twelfth node and has a critical rate of soaring:  
 а)  $v_{crit} = 8.46$  m/s ; б)  $v_{crit} = 6.5$  m/s; в)  $v_{crit} = 5$  m/s

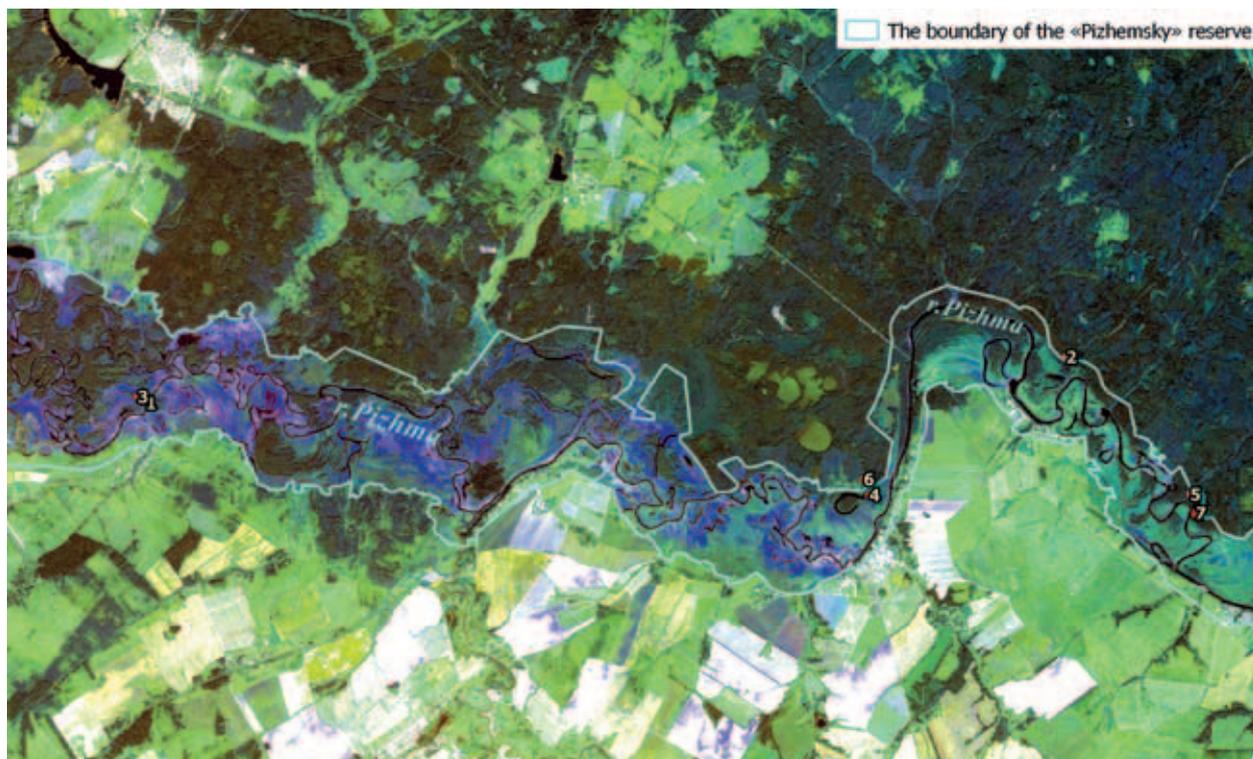


Fig. 1. The map of soil sampling sites in the territory of the “Pizhensky” reserve

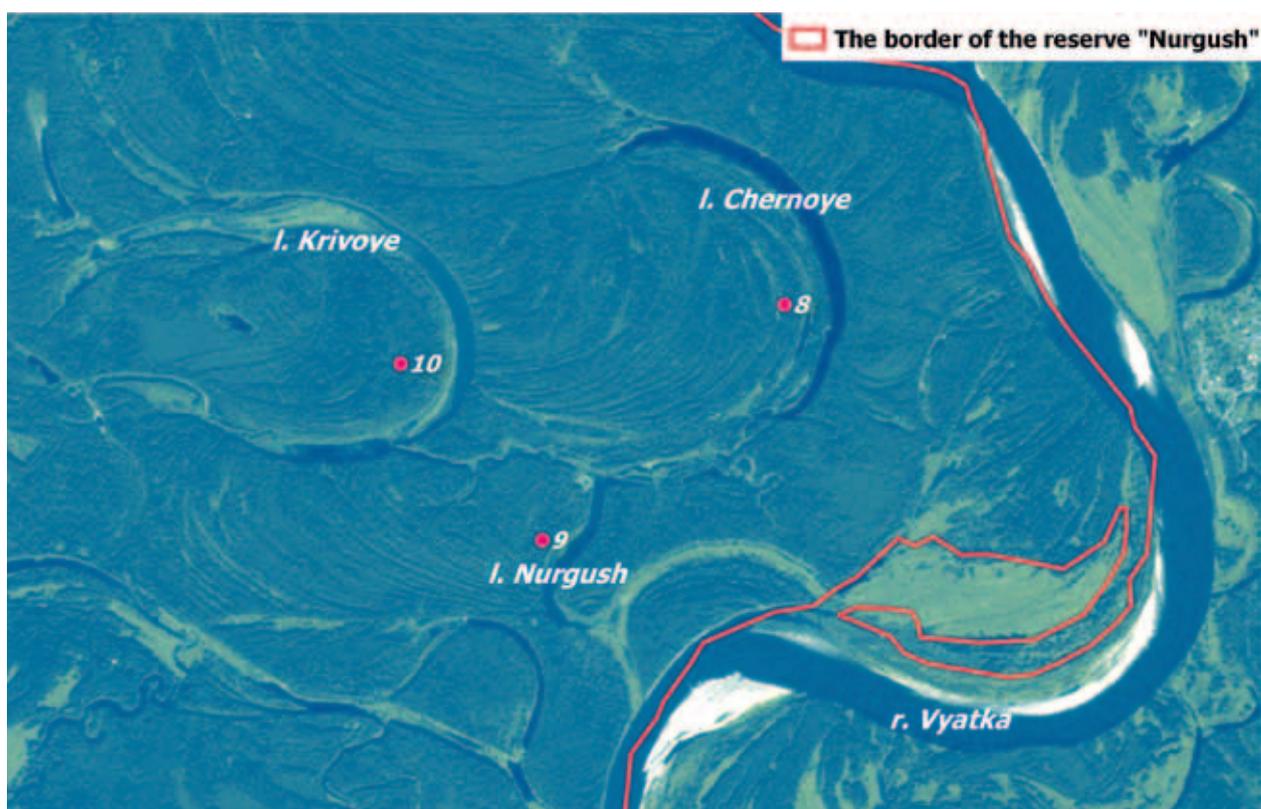


Fig. 2. The map of soil sampling sites in the territory of the reserve “Nurgush”

soil varied from 3.1 to 4.7 for meadow and from 1.17 to 7.3 for forest phytocenoses. Among the sites studied, sites No. 2 and No. 7 under forest phytocenoses had the highest content of organic matter. The soils of the lower horizon (depth 10–25 cm) were distinguished by high (site No. 3), medium (sites No. 4, No. 5), low (sites No. 1, No. 6, No. 2) and very low (site No. 7) content of organic matter. The obtained results are understandable, since the distribution of organic carbon down the profile sharply decreases.

For the territory of the “Nurgush” nature reserve, the content of organic matter in the upper horizons soils changed in a narrower range (from 2.0 to 6.7%). In general, the soils of the “Nurgush” nature reserve were characterized by low (No. 10), medium (No. 9) and high levels of organic matter (No. 8).

The content of nitrate and ammonium nitrogen in the soils of the studied sites varied widely. Relative evenness of the values of nitrate nitrogen in the soil (17.3–19.5 mg/kg) was distinguished in the sites located in the territory of the “Nurgush” nature reserve. The content of nitrate nitrogen there corresponded to the

average level of nitrogen in soils for plants (15–20 mg/kg). The content of ammonium nitrogen was lower than that of nitrate, and varied from 6.3 to 11.4 mg/kg.

In contrast to the “Nurgush” nature reserve, in samples taken from the upper horizons of the soils in the “Pizhensky” zakaznik the prevalence of ammonium nitrogen over the nitrate was noted for most of the sites studied with the exception of sites No. 4 and No. 3. The content of nitrate nitrogen in the upper horizons of meadow soil phytocenoses corresponded to the average level of provision of soils with nitrogen for plants (15–20 mg/kg), the content of nitrate nitrogen in the upper horizons of forest soil phytocenoses – very low level of provision (site No. 2), medium level (site No. 5), high level of provision for plants (site No. 3, 6, 7). In comparison with the upper horizons (8.1–18.4 mg/kg), of forest phytocenosis downward along the profile, an increase in the content of nitrate nitrogen (17.8–23.7 mg/kg) was noted downward along the profile in the soils of forest phytocenoses, except for site No. 3. For this site the highest content of nitrate nitrogen (62.4 mg/kg) was

Table 2

Agrochemical characteristics of the soils in the studied sites

Site	Horizon, cm	pH* <sub>KCl</sub>	Organic matter, %	N – NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> , mg/kg	N – NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> , mg/kg	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> , mg/kg
Soils under meadow phytocenosis. The “Pizhensky” zakaznik						
1	0–10	5.0	9.3±0.9	7.2±1.2	16.4±3.3	37 ± 7
	10–25	5.3	3.1±0.5	15.1±2.9	20.1±4.0	7.3 ± 2.6
4	0–10	5.5	11.5±1.2	34.5±1.7	17.7±3.5	11.0 ± 3.9
	10–25	5.2	4.7±0.7	3.2±0.1	16.3±3.3	ND
Soils under forest phytocenosis. The “Pizhensky” zakaznik						
5	0–10	4.8	12.0±1.2	16.3±1.8	10.9±2.2	ND
	10–25	4.6	4.3±0.6	21.0±1.1	23.4±4.7	ND
6	0–10	4.5	11.9±1.2	58.9±2.9	14.9±2.3	ND
	10–25	4.0	2.3±0.5	23.1±1.2	24±5	ND
2	0–10	5.4	20.3±2.0	47.0±4.0	8.1±2.4	37 ± 7
	10–25	4.6	2.6±0.5	17.6±0.9	17.8±3.6	ND
3	0–10	5.6	12.9±1.3	40.1±2.0	63±13	8.5 ± 3.0
	10–25	5.2	7.3±0.7	14.9±0.7	12.4±2.5	ND
7	0–10	4.4	21.3±2.1	94±5	18.4±3.7	ND
	10–25	4.5	1.17±0.23	76.5±3.8	22±4	40 ± 8
Soils under forest phytocenosis. The “Nurgush” nature reserve						
8	0–10	4.1	6.7±0.7	11.4±3.6	18.3±3.7	ND
9	0–10	4.8	4.2±0.6	6.3±1.1	17.3±3.5	ND
10	0–10	4.9	2.0±0.4	9.8±2.6	19.5±3.9	ND

Note: \*Acidity measurements are performed with the deviation of the results of repeated measurements from the arithmetic mean no more than 0.1 pH, ND – not detected (below the detection limit of the method used).

observed against the backdrop of the least acid reaction of salt extract from the soil.

The content of ammonium nitrogen in the upper soil horizons of meadow phytocoenoses of the “Pizhemsky” zakaznik varied from 7.2 to 34.5 mg/kg, of forest phytocoenoses – from 16.3 to 94 mg/kg. In contrast to nitrate nitrogen, a decrease in the content of ammonium nitrogen down the soil profile was noted for all the sites of forest phytocoenoses under the study.

The content of active phosphorus in the soil samples of the studied sites varied greatly. In most soil samples the content of active phosphorus was below the detection limit of the method. The only exceptions were sites No. 1 and No. 4 under meadow phytocoenoses, sites No. 2 and No. 3 under forest phytocoenoses located in the territory of the “Pizhemsky” zakaznik. Moreover, the maximum content of active phosphorus in the profile of the soils of the studied sites was in the upper horizons. With an increase in the depth of the soil profile, a gradual decrease in the content of active phosphorus was observed. The exception was site No. 7, where the content

of active phosphorus was maximal in the lower horizon and amounted to 40 mg/kg. Such an uneven distribution of phosphorus along the soil profile may be due to the heterogeneity of the granulometric composition of the soil-forming materials [9].

The samples of soils were characterized by different contents of heavy metals, which depended both on the location of soil sampling and on the horizon. However, it can be noted that among the studied metals in all soil samples manganese and iron were the main elements. This applies to both the active and the gross form of these metals (Table 3, 4). The content of the active form of iron in the samples varied from 5.3 to 318 mg/kg, and its gross form varied from 667 mg/kg to 26.3 g/kg. The content of the active form of manganese varied from 12 to 486 mg/kg, and the content of the gross form of this element in soil samples varied from 29 to 1295 mg/kg. The content of zinc in soil samples was smaller and amounted from 2.4 to 21 mg/kg in its active form, and from 20 to 84 mg/kg in its gross form. Other detectable heavy metals

Table 3

The content of the active form of heavy metals in the studied soil samples, depending on the location of the site and the depth of the horizon

Site	Horizon, cm	Content of heavy metals in the explored soils, mg/kg					
		Zn	Mn	Fe	Cu	Pb	Cd
The “Pizhemsky” zakaznik							
1	0–20	10.6±3.5	91±33	<b>320±80</b>	0.160±0.013	0.80±0.11	0.090±0.009
	20–25	4.9±1.6	47±17	132±33	0.300±0.024	1.49±0.12	0.095±0.010
2	0–5	12±4	120±40	5.3±1.3	0.050±0.004	1.72±0.14	0.070±0.007
	20–25	2.4±0.8	14±5	32±8	0.175±0.014	1.310±0.025	0.030±0.003
3	0–5	21±7	<b>490±180</b>	86±22	0.095±0.008	0.69±0.09	0.230±0.018
	20–25	<b>10.9±3.6</b>	63±23	190±50	0.170±0.014	0.72±0.10	0.115±0.012
4	0–5	10.8±3.6	260±90	<b>280±70</b>	0.360±0.029	1.02±0.08	<b>0.195±0.020</b>
	20–25	4.9±1.6	96±34	180±50	0.340±0.027	0.88±0.12	0.130±0.013
5	0–5	9.5±3.1	170±60	68±17	<b>1.28±0.08</b>	1.62±0.13	0.110±0.011
	20–25	3.4±1.1	9.0±3.2	200±50	0.17±0.014	1.24±0.10	0.060±0.006
6	0–5	2.5±0.8	190±70	39±10	0.030±0.002	2.10±0.16	0.120±0.012
	20–25	2.0±0.7	32±12	150±40	0.185±0.015	1.10±0.09	0.060±0.006
7	0–5	17±6	279±100	11.0±2.8	0.090±0.007	<b>2.27±0.18</b>	0.080±0.008
	20–25	3.6±1.2	19±7	45±15	0.185±0.015	1.39±0.11	0.040±0.004
The “Nurgush” nature reserve							
8	0–10	9.3±3.1	111±40	145±36	0.51±0.031	0.66±0.09	<b>0.195±0.020</b>
9	0–10	4.8±1.6	78±28	180±40	0.285±0.023	0.93±0.13	0.150±0.015
10	0–10	3.3±1.1	12±4	74±19	0.56±0.04	0.75±0.10	0.040±0.004
MPC	–	23	–	–	3	6	–

Note: the maximum values of an index are noted in bold. A dash means an absence of the approved standard.

Table 4

The content of the gross form of heavy metals in the studied soil samples, depending on the location of the site and the depth of the horizon

Site	Horizon, cm	Content of heavy metals in the explored soils, mg/kg					
		Zn	Mn	Fe	Cu	Pb	Cd
The "Pizhensky" zakaznik							
1	0–20	57±19	480±110	13300±3300	9.7±2.2	3.9±0.8	0.27±0.07
	20–25	29±10	96±22	3700±900	9.4±2.2	5.5±1.1	0.24±0.06
2	0–5	26±8	105±24	670±170	2.1±0.5	5.8±1.2	0.25±0.06
	20–25	24±8	126±29	2800±700	1.69±0.39	2.8±0.6	0.115±0.035
3	0–5	50±16	500±110	5300±1300	9.5±2.2	8.3±1.7	0.47±0.12
	20–25	54±18	780±180	13800±3500	11.3±2.6	7.6±1.6	0.26±0.06
4	0–5	28±9	200±50	12700±3200	15.8±3.6	8.3±1.7	0.36±0.08
	20–25	42±14	530±120	6000±1500	13.3±3.1	10.1±2.1	0.27±0.07
5	0–5	29±9	210±50	6000±1500	4.9±1.1	6.3±1.3	0.34±0.08
	20–25	20±6	29±7	3400±900	3.5±0.8	3.8±0.8	0.15±0.05
6	0–5	18±6	230±50	2700±700	4.6±1.1	10.1±2.1	0.24±0.06
	20–25	33±11	305±70	9900±2600	7.6±1.8	5.2±1.1	0.15±0.04
7	0–5	45±15	370±90	1900±500	2.8±0.6	<b>13.1±2.8</b>	0.20±0.05
	20–25	39±13	196±45	5200±1300	3.0±0.7	2.6±0.6	0.080±0.024
The "Nurgush" nature reserve							
8	0–10	<b>84±28</b>	<b>1300±300</b>	24028±6000	<b>25±6</b>	8.6±1.8	0.34±0.08
9	0–10	63±21	1100±240	<b>26000±7000</b>	14.9±3.4	8.0±1.7	0.22±0.05
10	0–10	23±8	170±40	5400±1300	12.1±2.8	5.2±1.1	0.13±0.04
MPC	–	100	1500	–	55	32	0.5

Note: the maximum values of an index are noted in bold. A dash means an absence of the approved standard.

such as copper, lead and cadmium were in the soil in small quantities, which indicates that there is no man-caused contamination of the soil in these sites.

For undisturbed natural soils, the most important factor determining the content of heavy metals is their content in the soil-forming material [10–12]. Most of the examined soil samples belonged to alluvial turf soils formed on modern alluvial sediments. Alluvial acidic soils are characterized by intensive alluvial process with deposition of a large amount of alluvium of light granulometric composition and flooding with fast flowing flood waters for a short time [13]. Modern alluvial deposits are characterized by an increased content of active Fe, Mn, Zn [14].

The highest content of active forms of manganese and iron was noted in soil samples of the upper horizons (Table 3). The maximum content of active manganese was noted in sample No. 3 from the territory of the "Pizhensky" zakaznik, collected in the oak forest. The maximum content of the active form of iron was noted for

the sites No. 1 and No. 4 of the "Pizhensky" zakaznik, both of these sites belong to meadow phytocenoses.

The obtained results are in agreement with the previously known ones [15] on the distribution of heavy metals in the soils of the North-east of the European part of Russia. It was noted that modern alluvial deposits in this region are characterized by an increased content of active forms of iron, manganese and zinc [16].

When determining the gross content of heavy metals in soil samples, the predominance of iron was noted, for which high values were observed both in soil samples from the upper horizon and in samples of soil selected lower along the profile (Table 4).

The maximum content of gross iron form was noted in sites No. 8 and No. 9 taken in the territory of the "Nurgush" nature reserve and it amounted to 24000 and 26300 mg/kg respectively. In the same samples, the maximum content of the gross form of manganese and zinc among the samples studied was noted. In sample No. 8, the manganese content was 1300 mg/kg, and the zinc

content was 84 mg/kg, which exceed the percent abundance of these elements in the lithosphere.

### Conclusion

Thus, as the result of the conducted studies it is established.

1. The soils of the SPNA studied were characterized as strongly and slightly acidic. At the same time, the soils in the territory of the “Nurgush” state nature reserve were characterized by a more acid reaction of the soil extract.

2. The determined values of organic matter for the soils of the “Pizhemsky” zakaznik varied from 3.1 to 4.7% for meadow and from 1.17 to 7.3% for forest phytocenoses. For the territory of the “Nurgush” state nature reserve the content of organic matter in the soils of the studied sites varied within a narrower range.

3. The content of nitrate nitrogen in the soils of the territory of the “Nurgush” nature reserve corresponded to the average level of nitrogen in soils for plants. A decrease in the content of ammonium nitrogen down the soil profile was noted for all the sites of forest phytocenoses under the study.

4. Among the metals studied, in both active and gross form, in all soil samples, the main content was elements such as manganese and iron. The highest content of active forms of manganese and iron was noted in soil samples of the upper horizons. Insignificant amounts of copper, lead and cadmium indicate the absence of man-caused contamination of the soil in these sites. Among the gross forms of metals, iron predominates in soil samples from the upper and lower horizons were stated. The maximum content of gross iron form was noted in the samples taken in the territory of the “Nurgush” nature reserve.

*The work was carried out within the framework of the grant of the President of the Russian Federation for state support of young Russian scientists MK-2120.2017.5.*

### References

1. Anthony B.P., Shestackova E. Do global indicators of protected area management effectiveness make sense? A case study from Siberia // *Environmental management*. V. 56. No. 1. 2015. P. 176–192.

2. Gray C.L., Hill S.L.L., Newbold T., Hudson L.N., Börger L., Contu S., Hoskins A.J.F., Purvis A., Schar-

lemann J.P.W. Local biodiversity is higher inside than outside terrestrial protected areas worldwide // *Nature Communications*. [Internet resource] <https://www.nature.com/articles/ncomms12306.pdf>. 2016. V. 72. Article No. 12306 (Accessed: 02.09.2018). doi: 10.1038/ncomms12306.

3. Dobrovolskiy G.V. Ecological role of soil in the biosphere and in human life // *Doklady po ekologicheskomu pochvovedeniyu*. 2007. V. 6. No. 2. P. 1–16 (in Russian).

4. Clayton T., Radcliffe N. Sustainability: a systems approach. Routledge. 2015. 256 p.

5. Tarasova E.M., Kondrukhova S.V., Tselishcheva L.G. National natural reserve “Nurgush” // *Theoretical and Applied Ecology*. 2009. No. 2. P. 90–97.

6. Prokashev A.M. The soils of the Vyatka region. Kirov. 1992. 88 p. (in Russian).

7. Prokashev A.M., Zhuykova I.A., Pakhomov M.M. The history of the soil-vegetation cover of the Vyatka-Kama region in the postglacial period. Kirov. 2003. 143 p. (in Russian).

8. Fedorets N.G., Bakhmet O.N. Ecological features of transformation of carbon and nitrogen compounds in forest soils. Petrozavodsk: Karel Scientific Center of the Russian Academy of Sciences. 2003. 240 p. (in Russian).

9. Kurnosova E.V., Grishin G.E. Anthropogenic impact on the phosphate regime of chernozem soil // *Vestnik Ulyanovskoy gosudarstvennoy selskokhozyaystvennoy akademii*. 2013. P. 19–24 (in Russian).

10. Alloway Brian J. Sources of heavy metals and metalloids in soils // *Heavy Metals in Soils*. 2013. P. 11–50.

11. Dragović S., Mihailović N., Gajić B. Heavy metals in soils: Distribution, relationship with soil characteristics and radionuclides and multivariate assessment of contamination sources // *Chemosphere*. 2008. V. 72. No. 3. P. 491–495.

12. Stevovi S., Mikovilović V.S., Čalić D. Environmental study of heavy metals influence on soil and Tansy (*Tanacetum vulgare* L.) // *African Journal of Biotechnology*. 2010. V. 9 (16). P. 2392–2400.

13. Onder S., Dursun S., Gezgin S., Demirbas A. Determination of heavy metal pollution in grass and soil of city centre green areas (Konya, Turkey) // *Polish J. of Environ. Stud.* 2007. V. 16. No. 1. P. 145–154.

14. Bain D.C. The weathering of ferruginous chlorite in a podzol from argyllshire, Scotland // *Geoderma*. 1977. V. 17. P. 193–208.

15. Shikhova L.N. Content and dynamics of heavy metals in soils of the North-East of the European part of Russia: Avtoref dis. ... doktora selskokhozyaystvennykh nauk. Sankt-Peterburg. 2005. 48 p. (in Russian).

16. Shikhova L.N., Lisitsyn E.M. Dynamics of stocks of organic matter of forest litter of South taiga biocenosis // *Vestnik Udmurtskogo universiteta*. 2015. V. 25. No. 2. P. 24–30 (in Russian).

**Фитопоглощение радия-226 из техногенно загрязнённых почв  
на примере *Chamaenerion angustifolium*,  
*Lathirus pratensis* и *L. vernus***

© 2018. Л. М. Шапошникова, к. б. н., н. с.,  
ФГБУН Институт биологии Коми научного центра Уральского отделения РАН,  
167982, Россия, г. Сыктывкар, ул. Коммунистическая, 28,  
e-mail: shaposhnikova.l.m@ib.komisc.ru

Исследовано влияние физико-химического состава радиоактивно загрязнённых почв на поглощение радия-226 иван-чаем узколистым (*Chamaenerion angustifolium*) и чиньей (*Lathirus pratensis*, *L. vernus*). Методами корреляционного и регрессионного анализа выявлено, что валовое содержание радия в исследуемых техногенных почвах больше всего зависит от содержания в них органического углерода и фосфора, содержание подвижных форм (ПФ) радионуклида связано с такими физико-химическими характеристиками как содержание органического углерода, а также обменных катионов кальция и магния. Межвидовых различий в накоплении радия указанными растениями выявлено не было. При этом содержание радия в растениях в большей степени было связано с валовым содержанием радионуклида в почвах, в то время как с содержанием ПФ радионуклида корреляция была менее значима. Основные факторы, влияющие на распределение радионуклида в почве, опосредованно влияли и на его содержание в растениях. К числу наиболее значимых можно отнести содержание органического вещества, фосфора, калия, соотношение физического песка (ФП) и физической глины (ФГ).

**Ключевые слова:** радий-226, биологическое поглощение, формы радия, факторы подвижности радия.

**Phytoabsorption of radium-226 from technogenically  
contaminated soils by the example of *Chamaenerion angustifolium*,  
*Lathirus pratensis* and *L. vernus***

© 2018. L. M. Shaposhnikova ORCID: 0000-0002-4181-4903,  
Institute of Biology of Komi Scientific Centre of the Ural Branch  
of the Russian Academy of Sciences,  
28, Kommunisticheskaya St., Syktyvkar, Russia, 167982,  
e-mail: shaposhnikova.l.m@ib.komisc.ru

The absorption of radium-226 by *Chamaenerion angustifolium*, *Lathirus pratensis* and *L. vernus* from podzolic soil contaminated with solid radioactive dumps (site 1) and alluvial sod soil contaminated with radioactive water (site 2) has been studied. The concentration of radium was 0.18–63.4 Bq/g of ashed weight (AW) in soil of site 1 and 0.05–21.4 Bq/g of AW in soil of site 2. The univariate analysis of variance did not reveal interspecific differences in the accumulation of the radionuclide by plants. However, the content of radium in plants selected from the area with dumps was higher than in the area contaminated with radioactive waters. Thus, the concentration of radium was 1.08–11.67 and 0.64–8.86 Bq/g of AW for *C. angustifolium* and *L. vernus* growing in the site 1 and 0.04–3.35 and 0.04–3.78 Bq/g of AW for *C. angustifolium* and *L. pratensis* sampled at site 2. The content of mobile (watersoluble and exchangeable) forms of radium in the soils of both sites was significantly indistinguishable. The obtained results showed that the concentration of radium in the studied plant species depends most on its total content in the soil and, to a lesser extent, on the content of its mobile forms. Multiple regression analysis showed that the total content of radium in contaminated soils depends to the greatest extent on the content of organic matter and phosphorus in them. The content of radium mobile forms is associated with the content of organic matter, as well as exchangeable cations of calcium and magnesium. The correlation between radium content in the plants and these alkali-earth elements was not confirmed. Among the most significant factors which affected radium adsorption by plants was the content of organic matter, phosphorus, potassium, the ratio of physical sand and physical clay.

**Key words:** radium-226, biological absorption, radium forms, mobility factors.

Фитопоглощение радионуклидов является сложным многофакторным процессом, связанным с биологическими особенностями растений, а также обусловленным влиянием внешних условий окружающей среды [1–3]. Видоспецифичность растений в поглощении радия широко обсуждается в литературе, в частности, в сфере возможного их использования в качестве фитоэкстрагентов [4, 5]. Почвы являются важнейшим биогеохимическим барьером для перехода радионуклидов в растительность. Однако в условиях техногенного радиоактивного загрязнения они характеризуются значительной неоднородностью физико-химических параметров, что влияет на специфику форм нахождения и биологическую доступность радионуклидов. Многообразие факторов, способных существенно изменить аккумуляцию радионуклидов поллютантов растениями в ту или иную сторону, делают интенсивность биологического поглощения сложнопрогнозируемым параметром и затрудняют его использование при построении различных радиоэкологических моделей.

Цель данной работы – изучение влияния различных физико-химических параметров радиоактивно загрязнённых почв на поглощение радия-226 иван-чаем узколистным (*Chamaenerion angustifolium* (L.) Holub) и чиной (*Lathyrus pratensis* L., *L. vernus* (L.) Bernh.).

### Материалы и методы исследований

Исследования проводили в Ухтинском районе Республики Коми на участках, загрязнённых более 60 лет назад твёрдыми (участок 1) и жидкими (участок 2) отходами производства радия из пластовых вод. Участок 1, представленный смешанным лесом, был загрязнён древесным углем, который по технологии производства радия сначала использовался в качестве сорбента, а затем выбрасывался в виде отходов, содержащих остаточное количество радионуклида. Почвенный покров участка представлен подзолистой почвой и характеризуется наличием подстилки мощностью 0–4 см, под которой находится слой этих отходов толщиной 7–23 см. Участок 2 является территорией бывшего химического завода и характеризуется пойменной аллювиально-дерновой почвой, на которой произрастает луговая растительность. Загрязнение участка произошло в результате сброса на поверхность почвы пластовых вод после добычи из них радия. Из-за несовершенства

технологии концентрация радионуклида в них оставалась повышенной, в результате содержание радия в почве увеличилось.

На участках проводили сопряжённый отбор образцов почв (слой 0–20 см) и надземных частей растений на определение содержания в них  $^{226}\text{Ra}$ . Для работы были выбраны растения, произрастающие на обоих участках, – иван-чай узколистный (*C. angustifolium*) семейства кипрейные (Onagraceae) и растения семейства бобовые (Fabaceae) – чина весенняя (*L. vernus*) и чина луговая (*L. pratensis*), произрастающие на участках 1 и 2 соответственно (101 образец). Растения сушили на воздухе, измельчали и озоляли в муфельной печи при 500 °С. Почвы также высушивали, растирали, просеивали и прокаливали при 600 °С.  $^{226}\text{Ra}$  в образцах определяли эманационным методом [6] с чувствительностью 0,07 Бк/г и ошибкой измерений 15%. Результаты рассчитаны на озолённую пробу.

Формы нахождения  $^{226}\text{Ra}$  в почвах анализировали методом последовательных вытяжек. Для определения водорастворимой формы использовали дистиллированную воду, обменной – 1М  $\text{CH}_3\text{COONH}_4$ , кислоторастворимой – 1М  $\text{HCl}$ . Соотношение твёрдой и жидкой фаз составило 1:10, время взаимодействия – 24 часа. Подвижными формами считали наиболее доступную для растений сумму водорастворимой и обменной фракций.

Физико-химический анализ почвы выполнен в лаборатории «Экоаналит» Института биологии Коми НЦ УрО РАН. Для статистической обработки данных использованы программы Microsoft Excel 2007 и Statistica 6.1.

### Результаты и их обсуждение

Тип загрязнения повлиял на специфику физико-химического состава исследуемых почв, что выражалось различиями в их характеристиках (табл. 1). Так, содержание фосфора, калия, обменного кальция и органического углерода в подзолистой почве, загрязнённой отвалами, было сравнительно выше. Удельная активность радия в образцах почв этого участка также значительно превосходила соответствующие значения для участка, загрязнённого отработанными пластовыми водами, при этом растения на каждом участке произрастали в близких интервалах содержания радионуклида в почве (рис. 1). В гранулометрическом составе обоих типов почв преобладали частицы размером > 10 мкм (ФП), значения рН были близки к нейтральным. С глубиной кислотность повы-

шалась, при этом подзолистая почва обладала более кислой реакцией [7].

Удельная активность радия в образцах растений и его коэффициенты биологического поглощения (КБП), равные отношению концентраций радионуклида в золе растений и почвы, также имели широкий диапазон варьирования. Результаты однофакторного дисперсионного анализа не выявили межвидовых различий в накоплении радионуклида. Однако были выявлены значительные различия между содержанием радионуклида в растениях, ото-

бранных на разных участках (рис. 2А). Так, данный показатель варьировал для иван-чая и чины, произрастающих на участке 1, в пределах 1,08–11,67 и 0,64–8,86 Бк/г и 0,04–3,35 и 0,04–3,78 Бк/г для этих же растений, отобранных на участке 2. КБП радия изменялись от 0,03 до 12,8 для *L. pratensis* и от 0,07 до 1,98 для *L. vernus*. Для образцов *C. angustifolium*, отобранных на участке 1 и 2, значения составили 0,09–14,8 и 0,03–6,76 соответственно. Достоверных различий КБП радия для разных видов растений при этом не показали (рис. 2В).

Таблица 1 / Table 1  
Физико-химические характеристики техногенно загрязнённых почв  
Physicochemical characteristics of technogenically contaminated soils

Физико-химический показатель Physicochemical characteristic	Подзолистая почва (участок 1) Podzolic soil (Site 1)	Аллювиально-дерновая почва (участок 2) Alluvial sod soil (Site 2)
$^{226}\text{Ra}$ , Бк/г / $^{226}\text{Ra}$ , Bq/g of AW	0,18–63,4	0,05–21,4
рН, ед. рН / рН, unit of рН	5,84–7,56	5,95–7,70
ГК, моль/кг / НА, mol/kg	0,02–0,30	0,005–0,07
$\text{Ca}^{2+}$ , моль/кг / $\text{Ca}^{2+}$ , mol/kg	0,07–1,09	0,05–0,47
$\text{Mg}^{2+}$ , моль/кг / $\text{Mg}^{2+}$ , mol/kg	0,005–0,07	0,004–0,08
$\text{P}_2\text{O}_5$ , мг/кг / $\text{P}_2\text{O}_5$ , mg/kg	26,5–2100	3,3–233
К, мг/кг / К, mg/kg	40,4–2070	83,2–440
$\text{C}_{\text{орг}}$ , % / $\text{C}_{\text{орг}}$ , %	0,89–40,1	0,24–11,7
ФГ, % / Particle size <10 $\mu\text{m}$ , %	9,16–15,7	12,9–44,8
ФП, % / Particle size >10 $\mu\text{m}$ , %	84,3–90,8	55,3–87,2

Обозначения:  $^{226}\text{Ra}$  – содержание радия; ГК – гидролитическая кислотность;  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$  – содержание ионов кальция и магния;  $\text{P}_2\text{O}_5$ , К,  $\text{C}_{\text{орг}}$  – содержание фосфора, калия и органического вещества; ФГ – физическая глина, ФП – физический песок.

Notes:  $^{226}\text{Ra}$  – content of radium; НА – hydrolytic acidity;  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$  – content of calcium and magnesium ions;  $\text{P}_2\text{O}_5$ , К,  $\text{C}_{\text{орг}}$  – content of phosphorus, potassium and organic carbon.

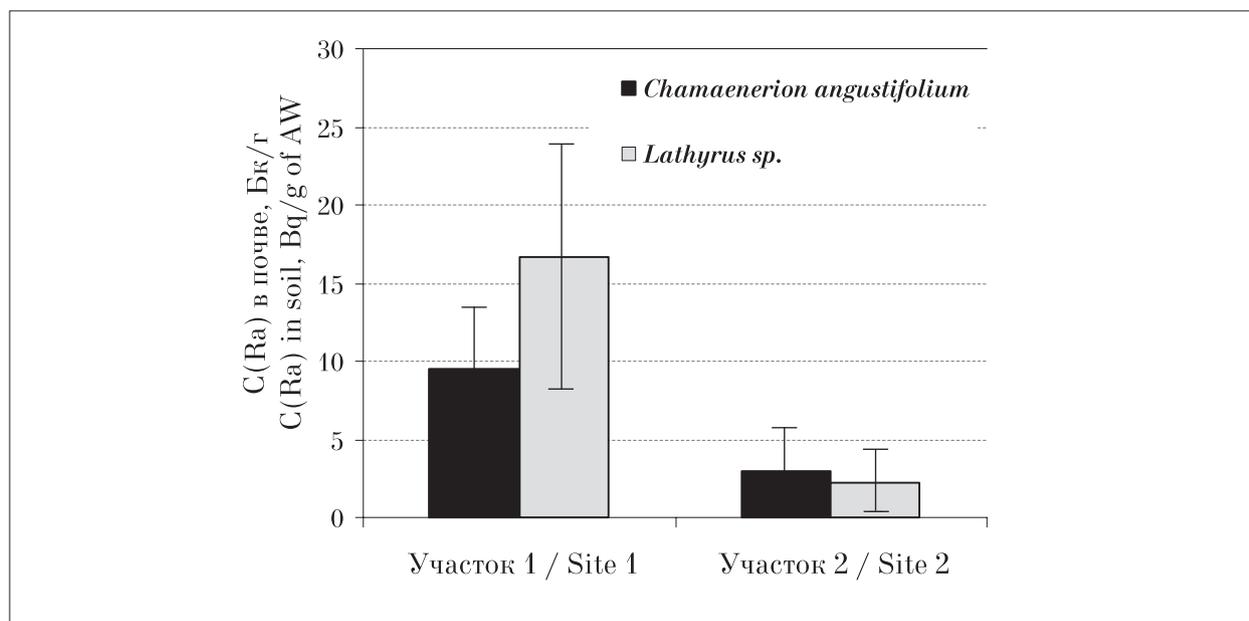


Рис. 1. Содержание радия-226 в почвах для разных видов растений  
Fig. 1. The content of radium-226 in soils for different plant species

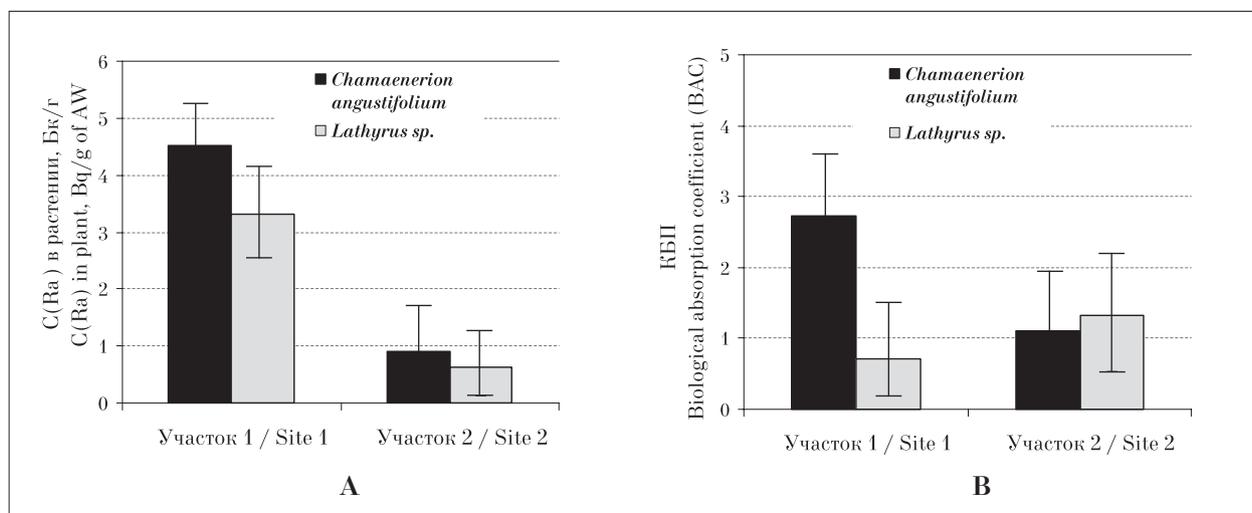


Рис. 2. Содержание радия-226 в растениях (А) и его КБП (В)  
 Fig. 2. The content of radium-226 in plants (A) and its biological absorption coefficients (BAC) (B)

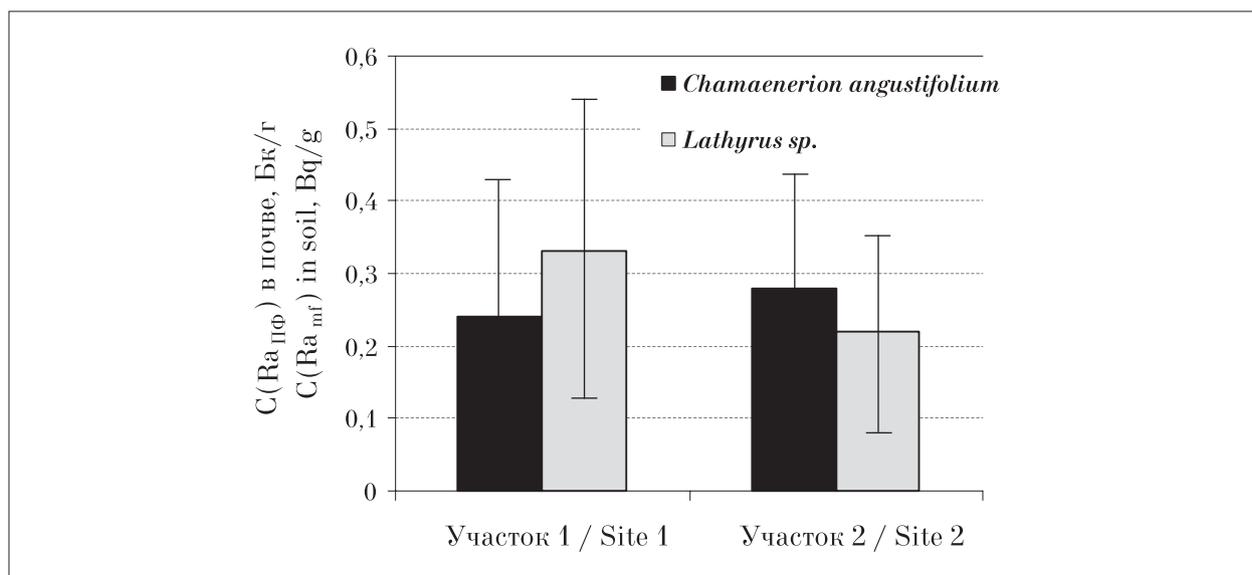


Рис. 3. Содержание подвижных форм радия-226 в почвах  
 Fig. 3. The content of mobile forms (mf) of radium-226 in soils

Считается, что поглощение разных элементов почвы происходит избирательно и связано с той ролью, которую они играют в метаболизме растений. В большом количестве поглощаются элементы, необходимые им для роста. Радионуклиды, в сравнении с необходимыми элементами питания, содержатся в почве в предельно низких концентрациях. Механизм их поглощения растениями до конца остаётся неясным. Некоторые радионуклиды в следовых количествах могут быть ассимилированы вместе с их соответствующими необходимыми для растений аналогами [1, 8]. Также считается, что количество радионуклидов, которое может быть поглощено растением, в большей степени связано с соотношением различных химических форм,

в которых они присутствуют в почве, определяющим их биодоступность.

Полученные результаты показали, что относительное количество наиболее доступных для растений водорастворимых и обменных форм радия выше в аллювиально-дерновой почве, загрязнённой радиоактивными водами. В среднем их доля здесь составила 21%, в то время как в почве участка, загрязнённого отходами, их содержание было около 9%. Доля кислоторастворимых форм радия, потенциально способных включаться в биологический цикл, в обоих типах почв в среднем составила 35%. Несмотря на то, что относительное количество доступных для растений форм радия в загрязнённой аллювиально-дерновой почве было выше, фактическое их содержание из-за более низких

валовых концентраций радионуклида практически не отличалось от содержания ПФ радия в загрязнённой подзолистой почве (рис. 3). Это указывало на то, что его биологическая доступность определялась не просто содержанием исследуемых ПФ, но и возможно различиями в физико-химическом составе техногенных почв.

К важным факторам, влияющим на подвижность радионуклидов, относят такие характеристики почвы как содержание органического вещества, присутствие комплексообразователей, кислотность почвенного раствора и др. Как следствие, их биологическое поглощение из разных типов почв может сильно отличаться. Растения, произрастающие на глинистых и органических почвах, демонстрируют более низкие значения коэффициентов накопления радия, что связано с поглощающими свойствами почвенного органо-минерального комплекса, песчаные и суглинистые – более высокие [1, 9, 10]. Кислотность почвенного раствора также значительно влияет на сорбцию радионуклида [11]. Обнаружена отрицательная корреляция между коэффициентами накопления радия и рН, между содержанием  $^{226}\text{Ra}$  в растительности и катионо-обменной ёмкостью почвы [9, 10, 12, 13]. Также считается, что радий, находясь в почвах в предельно низких концентрациях, не способен образовывать самостоятельную твёрдую фазу в процессе химических реакций, а следует за стабильными

носителями – другими элементами щелочно-земельной группы [8, 14–16].

Для определения факторов, влияющих на подвижность и биологическое поглощение радия, были исследованы зависимости содержания радионуклида в почвах и растениях от физико-химических параметров среды произрастания методами корреляционной и регрессионной статистики. Согласно результатам исследований, содержание валового и подвижного радия в загрязнённых почвах в основном коррелирует с одними и теми же параметрами, но в зависимости от типа почвы наблюдались различия в показателях, ответственных за распределение радионуклида, что вероятней всего было связано со значительными различиями в физико-химическом составе почв (табл. 2).

Так, в подзолистой почве удельная активность радия была достоверно связана с содержанием фосфора, а также её актуальной и потенциальной кислотностью, слабая корреляционная связь обнаруживалась с содержанием кальция, калия и органического вещества. В аллювиально-дерновой почве предикторами повышенных концентраций радионуклида являлось содержание органического вещества и обменных катионов кальция и магния. Полученные результаты частично согласуются с результатами работ [17, 18], в которых профильная дифференциация радия в радиоактивно загрязнённой подзолистой суглинистой почве также контролировалась процессами

Таблица 2 / Table 2

Корреляционная матрица Пирсона для зависимостей между содержанием  $^{226}\text{Ra}$  в почве и её физико-химическими характеристиками / The Pearson correlation matrix for the dependencies between the content of  $^{226}\text{Ra}$  in the soil and its physicochemical characteristics

Физико-химический показатель Physicochemical characteristic	Подзолистая почва (участок 1) Podzolic soil (Site 1)		Аллювиально-дерновая почва (участок 2) Alluvial sod soil (Site 2)	
	$^{226}\text{Ra}_{(\text{вал})}$ $^{226}\text{Ra}_{(\text{tot})}$	$^{226}\text{Ra}_{(\text{ПФ})}$ $^{226}\text{Ra}_{(\text{mf})}$	$^{226}\text{Ra}_{(\text{вал})}$ $^{226}\text{Ra}_{(\text{tot})}$	$^{226}\text{Ra}_{(\text{ПФ})}$ $^{226}\text{Ra}_{(\text{mf})}$
$^{226}\text{Ra}_{(\text{вал})} / ^{226}\text{Ra}_{(\text{tot})}$	1,00	0,94*	1,00	0,89*
$^{226}\text{Ra}_{(\text{ПФ})} / ^{226}\text{Ra}_{(\text{mf})}$	0,94*	1,00	0,89*	1,00
рН, ед. рН / pH, unit of pH	0,55*	0,48*	-0,01	-0,07
ГК / НА	0,43*	0,52*	0,37	0,44*
$\text{Ca}^{2+}$	0,32	0,42*	0,73*	0,73*
$\text{Mg}^{2+}$	-0,04	0,12	0,74*	0,70*
$\text{P}_2\text{O}_5$	0,77*	0,74*	-0,33	-0,27
К	0,28	0,26	0,34	0,37
$\text{C}_{\text{орг}} / \text{C}_{\text{org}}$	0,27	0,34	0,79*	0,80*
ФГ / Particle size < 10 $\mu\text{m}$	0,11	0,20	-0,08	0,05
ФП / Particle size > 10 $\mu\text{m}$	0,15	0,21	0,12	0,03

Примечание: \* – достоверно при  $p \leq 0,05$ .  
Note: \* – significant at  $p \leq 0,05$ .

вертикальной миграции соединений кальция. Содержание ПФ радия в обоих типах почв достоверно коррелировало с его валовым содержанием. Связь концентраций радия в почвах с соотношением в них фракций ФГ и ФП установить не удалось. Однако предыдущими исследованиями показано, что в обоих типах почв максимальное количество радионуклида сосредоточено во фракциях ФГ [7].

Необходимо отметить, что в исследуемой модели наблюдались корреляции отдельных параметров физико-химического состава не только с содержанием радия в почве. Некоторые факторы находились в линейной зависимости друг от друга. К примеру, наблюдалась корреляция содержания фосфора в почве с концентрациями калия (0,81), органического углерода (0,65) и гидролитической кислотностью (0,90); кальция с магнием (0,73), органическим углеродом (0,84), физической глиной (0,64) и рН (0,45), что усложняло задачу построения множественной регрессии. Тем не менее, построение регрессии методом последовательного включения факторов позволило выявить разницу в свойствах почв, непосредственно влияющих на подвижность радионуклида. Согласно полученным уравнениям валовое содержание радия в исследуемых загрязнённых почвах (независимо от типа) более всего зависело от содержания в них органического углерода и фосфора:

$$^{226}\text{Ra}_{(\text{вал})} = 0,629 \text{P}_2\text{O}_5 + 0,622 \text{C}_{\text{орг}} \quad (R^2 = 0,982, p < 0,001).$$

При этом, содержание ПФ радионуклида, напрямую зависящее от его валовой концентрации, было связано с такими характеристиками физико-химического состава почв как содержание органического углерода, а также обменных катионов кальция и магния:

$$^{226}\text{Ra}_{(\text{ПФ})} = 0,536 \text{Ra}_{(\text{вал})} + 0,567 \text{C}_{\text{орг}} + 0,48 \text{Mg}^{2+} + 0,44 \text{Ca}^{2+} \quad (R^2 = 0,718, p < 0,001).$$

Содержание радия в растениях также зависело от ряда показателей физико-химического состава почв. Результаты корреляционного анализа совокупности всех данных показали достоверную корреляцию с валовым содержанием радия в почве ( $r = 0,63, p \leq 0,05$ ), при этом с содержанием его ПФ связь оказалась менее значимой ( $r = 0,30$ ). Достоверная корреляция содержания радия в растениях также была получена с содержанием ФП ( $r = 0,62, p \leq 0,05$ ), из чего следует, что в почвах с большей долей песчаных фракций доступность радионуклида будет увеличиваться. К числу факторов, имеющих отношение к процессу биологического поглощения радия можно отнести также

содержание органического углерода в почве ( $r = 0,52, p \leq 0,05$ ) и калия ( $r = 0,47, p \leq 0,05$ ). Слабые корреляции были получены с содержанием фосфора ( $r = 0,38$ ) и кальция ( $r = 0,35$ ).

Таким образом, основные факторы, влияющие на распределение радионуклида в почве, опосредованно влияли и на его содержание в растениях. Однако, если содержание радионуклида в почве, особенно его ПФ, достоверно коррелировало с концентрацией его химического аналога кальция, то с содержанием радионуклида в растении эта связь оказалась слабовыраженной. Кальций играет важную роль в процессе роста и питания растений. Показано, что при его повышенном содержании в почвах интенсивность поступления радия в растения может снижаться [19]. Возможно, это связано с конкуренцией щелочноземельных металлов за адсорбционные центры на поверхности корня. Радий имеет преимущество в этой конкуренции из-за большого ионного радиуса. Но так как в почвенном растворе он обычно представлен в предельно низких концентрациях, то в присутствии щелочноземельных элементов в высоких концентрациях поглощение радия может подавляться [1, 13, 19]. Низкая же доступность кальция в почве может вызвать антагонистический эффект поглощения радия растительностью, что связано с нарушением гомеостатического равновесия в растении [20].

### Заключение

Поглощение радия-226 растениями является сложным многофакторным процессом, на который значительное влияние оказывает физико-химический состав почв. Исследование аккумулирующих свойств растений *C. angustifolium*, *L. pratensis*, *L. vernus* не выявило достоверных межвидовых различий в накоплении радионуклида, однако были обнаружены значительные различия в его накоплении растениями на участках с разным типом почв и загрязнений. Полученные результаты свидетельствовали, что содержание радионуклида в исследуемых видах растений более всего зависело от его валового содержания в почве и в меньшей степени от содержания выделенных ПФ радионуклида. Предикторами повышенных концентраций валового радия в исследуемых техногенных почвах являлось содержание фосфора и органического углерода. Концентрации ПФ радионуклида были связаны также с содержанием катионов кальция и магния, что подтверждалось данными мно-

жественного регрессионного анализа. К числу ведущих факторов подвижности радия можно также отнести актуальную и потенциальную кислотности почвенного раствора.

Факторы, влияющие на миграционную способность радионуклида в почвах, опосредованно влияли и на его содержание в растениях. Результаты корреляционного анализа показали, что к числу наиболее значимых можно отнести содержание органического углерода, калия, фосфора, соотношение ФП и ФГ. Несмотря на то, что содержание ПФ радия в почвах достоверно коррелировало с содержанием обменных катионов кальция и магния, выраженной связи между содержанием радионуклида в растениях и вышеуказанными щелочноземельными элементами выявлено не было.

*Работа выполнена в рамках Госзадания № АААА-А18-118011190102-7.*

*Автор выражает благодарность с.н.с., к.б.н. И. И. Шуктомовой, зав. лаб., к.б.н. Н. Г. Рачковой, сотрудникам лабораторий миграции радионуклидов и радиохимии и «Экоаналит» ИБ Коми НЦ УрО РАН.*

### Литература

1. Алексахин Р.М., Архипов Н.П., Бархударов Р.М., Василенко И.Я., Дричко В.Ф., Иванов Ю.А., Маслов В.И., Маслова К.И., Никифоров В.С., Поликарпов Г.Г., Попова О.Н., Сироткин А.Н., Таскаев А.И., Тестов Б.В., Титаева Н.А., Февралева Л.Т. Тяжёлые естественные радионуклиды в биосфере: Миграция и биологическое действие на популяции и биогеоценозы. М.: Наука, 1990. 368 с.
2. Chen S.B., Zhu Y.G., Hu Q.H. Soil to plant transfer of  $^{238}\text{U}$ ,  $^{226}\text{Ra}$  and  $^{232}\text{Th}$  on a uranium mining-impacted soil from southeastern China // *Journal of Environmental Radioactivity*. 2005. V. 82 (2). P. 223–236.
3. Hu N., Ding D., Li G., Zheng Ji., Li L., Zhao W., Wang Y. Vegetation composition and  $^{226}\text{Ra}$  uptake by native plant species at a uranium mill tailings impoundment in South China // *Journal of Environmental Radioactivity*. 2014. V. 129. P. 100–106.
4. Vandenhove H. Phytomanagement of radioactively contaminated sites // *Phytoremediation of Metal-Contaminated Soils*. Springer, 2006. P. 191–228.
5. Nezami S., Malakouti M.J., Samani A.B., Maragheh M.G. Effect of low molecular weight organic acids on the uptake of  $^{226}\text{Ra}$  by corn (*Zea mays* L.) in a region of high natural radioactivity in Ramsar Iran // *Journal of Environmental Radioactivity*. 2016. V. 164. P. 145–150.
6. Старик И.Е. Основы радиохимии. Л.: Наука, 1969. 247 с.
7. Noskova L.M., Shuktomova I.I. Radium distribution in anthropogenic soils as a function of soil physicochemical and mineralogical parameters // *Geochemistry International*. 2015. V. 53. No. 11. P. 1012–1018. doi: 10.1134/S0016702915090050.
8. Chao J.H., Chuang C.Y. Accumulation of radium in relation to some chemical analogues in *Dicranopteris linearis* // *Applied Radiation and Isotopes*. 2011. V. 69. P. 261–267.
9. Vandenhove H., Van Hees M. Predicting radium availability and uptake from soil properties // *Chemosphere*. 2007. V. 69 (4). P. 664–674.
10. Vandenhove H., Olyslaegers G., Sanzharova N., Shubina O., Reed E., Shang Z., Velasco H. Proposal for new best estimates of the soil-to-plant transfer factor of U, Th, Ra, Pb and Po // *Journal of Environmental Radioactivity*. 2009. V. 100 (9). P. 721–732.
11. Гиль Т.В. Влияние pH среды на поглощение радия типичной сильноподзолистой почвой (в экспериментальных условиях) // Миграция и биологическое действие естественных радионуклидов в условиях северных биогеоценозов: Тр. Коми филиала АН СССР № 46. Сыктывкар, 1980. С. 58–64.
12. Hewamanna R., Samarkoon C.M., Kurunaratne P.A.V.N. Concentration and chemical distribution of radium in plants from monazite-bearing soils // *Environ. Exp. Plant Bot.* 1988. V. 28. P. 137–143.
13. Lauria D.C., Ribeiro F.C.A., Conti C.C., Loureiro F.A. Radium and uranium levels in vegetables grown using different farming management systems // *Journal of Environmental Radioactivity*. 2009. V. 100. P. 176–183.
14. Uchida S., Tagami K. Soil-to-crop transfer factors of radium in Japanese agricultural fields // *Journal of Nuclear and Radiochemical Sciences*. 2007. V. 8 (2). P. 137–142.
15. Таскаев А.И. Закономерности распределения и миграции изотопов U, Th, Ra и Rn в почвенно-растительном покрове района повышенной естественной радиации: Дисс... канд. биол. наук. Сыктывкар, 1978. 137 с.
16. Medley P., Bollhofer A. Influence of group II metals on Radium-226 concentration ratios in the native green plum (*Buchanania obovata*) from the Alligator Rivers Region, Northern Territory, Australia // *Journal of Environmental Radioactivity*. 2016. V. 151. P. 551–557.
17. Рачкова Н.Г. Роль сорбентов в процессах трансформации соединений урана, радия и тория в подзолистой почве: Автореф. дисс... канд. биол. наук. Сыктывкар, 2006. 22 с.
18. Рачкова Н.Г., Зайнуллин В.Г. Моделирование подвижности радия-226 в загрязнённых подзолистых почвах на основе данных регрессионного анализа // Актуальные проблемы региональной экологии и биодиагностика живых систем: Материалы XIII Всерос. науч.-практ. конф. с междунар. участием. Киров, 2015. Книга 2. С. 194–197.
19. Таскаев А.И., Овченков В.Я., Алексахин Р.М., Шуктомова И.И. Поступление  $^{226}\text{Ra}$  в растения и измене-

ние его состояний в звене почва-надземная масса-опад // Почвоведение. 1977. № 2. С. 42–48.

20. Pulhani V.A., Dafauti S., Hegde A.G., Sharma R.M., Mishra U.C. Uptake and distribution of natural radioactivity in wheat plants from soil // Journal of Environmental Radioactivity. 2005. V. 79. No. 3. P. 331–346.

### References

1. Aleksakhin R.M., Arkhipov N.P., Barkhudarov R.M., Vasilenko I.Ya., Drichko V.F., Ivanov Yu.A., Maslov V.I., Maslova K.I., Nikiforov V.S., Polikarpov G.G., Popova O.N., Sirotkin A.N., Taskaev A.I., Testov B.V., Titayeva N.A., Fevrалеva L.T. Heavy natural radionuclides in biosphere: Migration and biological effects on population and biogeocenoses. Moskva: Nauka, 1990. 368 p. (in Russian).

2. Chen S.B., Zhu Y.G., Hu Q.H. Soil to plant transfer of  $^{238}\text{U}$ ,  $^{226}\text{Ra}$  and  $^{232}\text{Th}$  on a uranium mining-impacted soil from southeastern China // Journal of Environmental Radioactivity. 2005. V. 82 (2). P. 223–236.

3. Hu N., Ding D., Li G., Zheng Ji., Li L., Zhao W., Wang Y. Vegetation composition and  $^{226}\text{Ra}$  uptake by native plant species at a uranium mill tailings impoundment in South China // Journal of Environmental Radioactivity. 2014. V. 129. P. 100–106.

4. Vandenhove H. Phytomanagement of radioactively contaminated sites // Phytoremediation of Metal-Contaminated Soils. Springer, 2006. P. 191–228.

5. Nezami S., Malakouti M.J., Samani A.B., Maragheh M.G. Effect of low molecular weight organic acids on the uptake of  $^{226}\text{Ra}$  by corn (*Zea mays* L.) in a region of high natural radioactivity in Ramsar Iran // Journal of Environmental Radioactivity. 2016. V. 164. P. 145–150.

6. Starik I.E. Fundamentals of radiochemistry. Leningrad: Nauka, 1969. 247 p. (in Russian).

7. Noskova L.M., Shuktomova I.I. Radium distribution in anthropogenic soils as a function of soil physico-chemical and mineralogical parameters // Geochemistry International. 2015. V. 53. No. 11. P. 1012–1018. doi: 10.1134/S0016702915090050.

8. Chao J.H., Chuang C.Y. Accumulation of radium in relation to some chemical analogues in *Dicranopteris linearis* // Applied Radiation and Isotopes. 2011. V. 69. P. 261–267.

9. Vandenhove H., Van Hees M. Predicting radium availability and uptake from soil properties // Chemosphere. 2007. V. 69 (4). P. 664–674.

109. Vandenhove H., Olyslaegers G., Sanzharova N., Shubina O., Reed E., Shang Z., Velasco H. Proposal for new

best estimates of the soil-to-plant transfer factor of U, Th, Ra, Pb and Po // Journal of Environmental Radioactivity. 2009. V. 100 (9). P. 721–732.

11. Gil T.V. The influence of the pH of the medium on the absorption of radium by a typical strongly podzolic soil (under experimental conditions) // Migration and biological action of natural radionuclides under conditions of northern biogeocenoses: Tr. Komi filiala AN SSSR. No. 46. Syktyvkar, 1980. P. 58–64 (in Russian).

12. Hewamanna R., Samarkoon C.M., Kurunaratne P.A.V.N. Concentration and chemical distribution of radium in plants from monazite-bearing soils // Environ. Exp. Plant Bot. 1988. V. 28. P. 137–143.

13. Lauria D.C., Ribeiro F.C.A., Conti C.C., Loureiro F.A. Radium and uranium levels in vegetables grown using different farming management systems // Journal of Environmental Radioactivity. 2009. V. 100. P. 176–183.

14. Uchida S., Tagami K. Soil-to-crop transfer factors of radium in Japanese agricultural fields // Journal of Nuclear and Radiochemical Sciences. 2007. V. 8 (2). P. 137–142.

15. Taskaev A.I. Regularities in the distribution and migration of U, Th, Ra and Rn isotopes in the soil-vegetation cover of the region of increased natural radiation: Diss. ... kand. biol. nauk. Syktyvkar, 1978. 137 p. (in Russian).

16. Medley P., Bollhofer A. Influence of group II metals on Radium-226 concentration ratios in the native green plum (*Buchanania obovata*) from the Alligator Rivers Region, Northern Territory, Australia // Journal of Environmental Radioactivity. 2016. V. 151. P. 551–557. doi: 10.1016/j.jenvrad.2015.07.013.

17. Rachkova N.G. The role of sorbents in the processes of transformation of uranium, radium and thorium compounds in podzolic soil: Avtoref. diss... kand. biol. nauk. Syktyvkar, 2006. 22 p. (in Russian).

18. Rachkova N.G., Zaynullin V.G. Modeling the mobility of radium-226 in contaminated podzolic soils based on regression analysis data // Actual problems of regional ecology and biodiagnosis of living systems: Materialy XIII Vseross. nauch.-prakt. konf. s mezhdunar. uchastiyem. Kirov, 2015. Kniga 2. P. 194–197 (in Russian).

19. Taskaev A.I., Ovchenkov V.Ya., Aleksakhin R.M., Shuktomova I.I. The uptake of  $^{226}\text{Ra}$  by plants and the change in its states in the soil-overground mass-fall // Pochvovedenie. 1977. No. 2. P. 42–48. (in Russian).

20. Pulhani V.A., Dafauti S., Hegde A.G., Sharma R.M., Mishra U.C. Uptake and distribution of natural radioactivity in wheat plants from soil // Journal of Environmental Radioactivity. 2005. V. 79. No. 3. P. 331–346.

## The use of glauconite for stabilization and improvement of ammonium nitrate agrochemical properties

© 2018. Yu. N. Terentyev<sup>1</sup> ORCID: 0000-0001-7812-6007, N. V. Syrchina<sup>2</sup> ORCID: 0000-0001-8049-6760  
 N. N. Bogatyryova<sup>2</sup> ORCID: 0000-0002-6028-6632, T. Ya. Ashikhmina<sup>2, 3</sup> ORCID: 0000-0003-4919-0047  
 A. V. Sazanov<sup>2</sup> ORCID: 0000-0002-6934-3330, M. L. Sazanova<sup>2</sup> ORCID: 0000-0003-3492-8395  
 V. N. Pugach<sup>2</sup> ORCID: 0000-0003-1220-4062, V. A. Kozvonin<sup>2</sup> ORCID: 0000-0002-2447-6949, A. A. Burkov<sup>2</sup> ORCID: 0000-0002-3627-1262

<sup>1</sup> LLC RG-ASU-NALADKA,  
 Building 2, 34, Fedorova St., Podolsk, Moscow Region, Russia, 142100,

<sup>2</sup> Vyatka State University,

36, Moskovskaya St., Kirov, Russia, 610000,

<sup>3</sup>Institute of Biology of the Komi Scientific Centre of the Ural Branch of RAS,  
 28, Kommunisticheskaya St., Syktyvkar, Republic of Komi, Russia, 167982,  
 e-mail: nvms1956@mail.ru, usr11759@vyatsu.ru, teryun@yandex.ru

The development of new forms of nitrogen-containing mineral fertilizers complying with world safety standards is currently quite a relevant problem. Existing forms of combined fertilizers including ammonium nitrate and carbonates have a number of disadvantages (hygroscopicity, caking, partial ammonium nitrogen decline). Therefore active search of new components with certain advantages is conducted. At the same time, their inclusion into the fertilizers' composition should ensure a high level of plants' nitrogen assimilation, exclude environmental pollution and comport with Green Chemistry principles; low cost and the possibility of large-tonnage output in Russian Federation is also of great importance.

The quartz-glauconitic sandstone from Beloozero deposit (Lysogorsky district, Saratov region) is considered as such a component. Its chemical composition is determined by the mass-spectroscopy with inductively coupled plasma and atomic emission spectroscopy with inductively coupled plasma. The technique of glauconite introduction into the combined mineral fertilizer with ammonium nitrate was tested. The ammonium nitrate and glauconite ratios are selected to ensure the fertilizer thermostability and meet the European Union standards. The evaluation was carried out by thermogravimetry and differential-thermal analysis. The properties of the obtained fertilizer were tested by bioassay. It was definitely proved that the obtained fertilizer has a favorable effect on the seeds germination and seedlings development.

Thus, granulated composition containing 80% of AN and 20% of glauconite allows to decrease the nitrogen content in the fertilizer finished form to 27–28%, which provides the fire-safety and explosion-safety required level, eliminates the risk of pellets caking during storage, promotes an increase in fertilizer's agrochemical efficiency and allows to decrease the fertilizer's application rates and, consequently, to reduce the environmental burden.

**Keywords:** ammonium nitrate, glauconite, explosion-safety, phytotoxicity, bioassay.

УДК 661.152

## Применение глауконита для стабилизации и улучшения агрохимических свойств аммиачной селитры

© 2018. Ю. Н. Терентьев<sup>1</sup>, главный технолог, Н. В. Сырчина<sup>2</sup>, к. х. н., доцент,  
 Н. Н. Богатырёва<sup>2</sup>, аспирант, Т. Я. Ашихмина<sup>2, 3</sup>, д. т. н., профессор, зав. кафедрой,  
 зав. лабораторией, А. В. Сазанов<sup>2</sup>, к. б. н., доцент, М. Л. Сазанова<sup>2</sup>, к. б. н., доцент,  
 В. Н. Пугач<sup>2</sup>, к. э. н., доцент, ректор,  
 В. А. Козвонин<sup>2</sup>, к. м. н., с. н. с., А. А. Бурков<sup>2</sup>, к. х. н., доцент,  
<sup>1</sup>ООО «РГ-АСУ-НАЛАДКА»,

142100, Россия, Московская область, г. Подольск, ул. Федорова, д. 34, стр. 2,

<sup>2</sup>Вятский государственный университет,

610000, Россия, г. Киров, ул. Московская, 36,

<sup>3</sup>Институт биологии Коми НЦ УрО РАН,

167982, Россия, г. Сыктывкар, ул. Коммунистическая, 28,

e-mail: nvms1956@mail.ru, usr11759@vyatsu.ru, teryun@yandex.ru

Разработка новых форм азотсодержащих минеральных удобрений, соответствующих мировым нормам безопасности, является на данный момент достаточно актуальной задачей. Существующие формы комбинированных удобрений, включающие аммиачную селитру и карбонаты, обладают рядом недостатков (гигроскопичность, слеживаемость, потеря части аммонийного азота), поэтому ведётся активный поиск новых компонентов, обладающих определёнными преимуществами. При этом их введение в состав удобрений должно обеспечивать высокий уровень усвоения азота растениями, исключать загрязнение окружающей среды и соответствовать принципам Зелёной химии, важным фактором так же является невысокая стоимость и возможность получения в крупнотоннажных объёмах на территории Российской Федерации.

В качестве такого компонента рассматривается глауконитовый песок Белоозёрского месторождения Лысогорского района Саратовской области. Установлен его химический состав масс-спектральным с индуктивно-связанной плазмой и атомно-эмиссионным с индуктивно-связанной плазмой методами. Отработана методика введения данного компонента в состав комбинированного минерального удобрения с аммиачной селитрой. Подобраны процентные соотношения аммиачной селитры и глауконита, обеспечивающие термостабильность удобрения и отвечающие критериям Европейского Союза. Оценка проводилась методом термогравиметрии и дифференциально-термического анализа. Исследованы свойства полученного удобрения в эксперименте методом биотестирования. Достоверно доказано, что полученное удобрение оказывает благоприятное влияние на прорастание семян и развитие проростков редиса и озимой ржи.

Таким образом, получение гранулированной композиции, содержащей 80% аммиачной селитры и 20% глауконита позволяет снизить содержание азота в готовой форме удобрения до 27–28%, что обеспечивает требуемый уровень пожаро- и взрывобезопасности, устраняет опасность слеживаемости гранул при хранении, способствует повышению агрохимической эффективности удобрения, позволяет снизить нормы внесения удобрения в почвы и уменьшить таким образом экологическую нагрузку на окружающую среду.

**Ключевые слова:** аммиачная селитра, глауконит, взрывобезопасность, фитотоксичность, биотестирование.

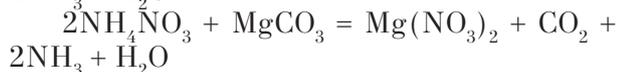
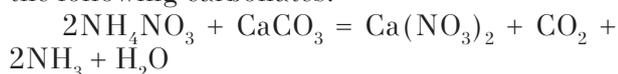
The orientation towards the introduction of environmental technologies and the output of products comporting with environmental standards is the most important trend in the development of modern chemical industry. Modernization of existing and development of new chemical processes and materials comporting with Green Chemistry principles [1] contributes preventing environmental pollution as well as improving the economic efficiency and competitiveness of industrial enterprises. The ecologization problem of large-tonnage chemical enterprises (e. g. the ammonium nitrate (AN) output) is of particular importance. In accordance with Merchant Research & Consulting [2], ammonium nitrate accounts for more than 15% of the world nitrogen fertilizer market, the world total demand for which will be about 120 million tons (in terms of the active matter) in 2018 [3]. Currently 13 enterprises in the Russian Federation produce AN, 8.75 million tons AN were produced there in 2017. More than 60% of the AN produced in Russia is used for domestic consumption, including for agriculture consumes 70% (3.8 million tons), and for industry – 30% (1.56 million tons) [4].

Ammonium nitrate is a highly efficient nitrogen fertilizer, suitable for use on all soils' types [5]. This fertilizer is water-soluble, contains no ballast substances and combines with other non-alkaline mineral and organic fertilizers. Ammonium nitrate can be used as a preplant (basic) fertilizer or a nitrogen top dressing during vegetation, or it can be applied in rows or holes while sowing. Despite its obvi-

ous advantages, this fertilizer has a number of significant drawbacks, including explosibility, toxicity, nitrate component leachability from the root-inhabited soil horizon, increased hygroscopicity and storage caking [6]. Due to the denitrification and leaching processes, and also microbiological nitrates soil fixing, the nitrogen mineral forms utilization by the majority of agricultural crops does not exceed 40–50% of the applied dose [7]. These drawbacks significantly decrease the AN competitiveness in the mineral fertilizer market. Moreover, nitrates' high mobility in soils is associated with the emergence of environmental problems caused by nitrate environmental pollution.

The inclusion in the AN composition of components which will increase material's thermostability and will contribute to the improvement of its technological, commodity, agrochemical and ecological characteristics is the main direction in AN drawbacks' correcting as a mineral fertilizer. At present, cheap and available calcium and magnesium carbonates (limestone, chalk, dolomite) are frequently used as such ingredients [8]. Due to the above-mentioned carbonates' inclusion in the AN composition, the obtaining an explosion-proof fertilizer that does not significantly acidify soils becomes possible. Calcium-ammonium nitrate (CAN) is widely used in the European Union countries as fertilizer [9], its output has also been mastered in Russia. Despite carbonate components obvious advantages as AN stabilizers, their inclusion in the fertilizer composition has also very significant drawbacks, such as possibility

of ammonium nitrate chemical interaction with the following carbonates:



The carbonates chemical interaction with ammonium nitrate leads to the ammonia liberation and calcium and magnesium nitrates formation. This process's speed increases while heating (mixing of AN fusion cake with carbonates). Calcium and magnesium nitrates are highly hygroscopic, that decreases the CAN granules stability during storage. Significant problems arise when granulating a mixture of AN with lime ingredients in granulation towers, as well as in centrifugal or screw granulators. The risk of granulators holes clogging with solid particles or sticking on the apparatus parts granulated mixture inhibits or excludes the typical equipment's using in traditional AN production [10]. In addition, in order to obtain a suitable fusion cake granulation mixture or a concentrated AN solution with calcareous components, careful grinding of the appropriate ingredients and calcium nitrate formation inhibitors applying are required. Ammonium phosphate and sulfate are suitable inhibitors as they stimulate the gypsum-phosphate shell formation on carbonate particles.

It should be noted that the calcareous components applied into the moist soil simultaneously with the AN increase the soil pH, that leads to the partial ammonium nitrogen decline due to the ammonium nitrate decomposition.

The glauconite choice for inclusion in the AN was determined by the following factors [11–17]:

- glauconite is a thermostable natural mineral that has no negative environmental effect;
- rich glauconite deposits are widely distributed in Russian Federation;
- this mineral is characterized by favorable granulometric composition for inclusion in the AN composition, low cost and availability;
- high sorption and cation exchange capacity is typical for glauconite;
- glauconite includes a number of valuable for crops macro- and micronutrients (K, Ca, Mg, Mn, Cr, Co, Cu, Zn, etc.), capable of passing into the soil solution due to the ion exchange processes;
- due to ion-exchange processes glauconites are able to bind ammonium cations, that reduce nitrogen declines while nitrification and leaching;

– the applying glauconites improve soils structural and mechanical properties and provides a meliorative effect.

Thus, the calcareous components inclusion in the AN composition can not be considered as an optimal problem solution of the fertilizer's thermostability. Research to find new promising materials for the AN stabilization is of great relevance and practical value.

Analyses of the possibility and expediency of glauconite inclusion in the AN composition for ensuring thermostability and improving the agrochemical efficiency of the fertilizer ingredient, is the aim of the work.

The research problems are:

- obtaining granular composition experimental samples with 80% of AN and 20% of glauconite;
- analyses of glauconite effect on the AN thermal stability;
- evaluating the effect of glauconite supplement on the AN phytotoxic properties.

### Objects and methods

Ammonium nitrate grade B (GOST 2-2013) and glauconite, isolated by magnetic separation from quartz-glauconitic sandstone (GS) from Beloozero deposit (Lysogorsky district, Saratov region), were used for the experimental studies implementation. The GS glauconite content is an average of 50%. The pit-run GS was screened for separating coarse mechanical impurities (more than 10 mm) and dried at a temperature of 70–100 °C to a residual moisture not more than 3%. The after-drying GS was fractioned:

- mechanical impurities of more than 1.5 mm;
- grits from 0.63 to 1.50 mm;
- GS used for magnetic separation (less than 0.63 mm).

GS fractioning was carried out using two shaker screens with cells of 1.5 mm and 0.63 mm.

A magnetic highly inductive separator CMVi was used to separate the glauconite (magnetic fraction) from the quartz sand ballast fraction (non-magnetic fraction). The glauconite content in purified GS was 95 to 98%. The product was a fine, loose, non-hygroscopic powder of gray-green color. The glauconite grains size was in the range from 5 to 60 μm.

The glauconite chemical composition analysis was carried out by mass spectroscopy with inductively coupled plasma (MS) and atomic emission spectroscopy with inductively coupled plasma (AE). An inductively coupled plasma mass spectrometer Elan-6100 (“Perkin-

Elmer", USA) and an atomic emission plasma-inductively coupled spectrometer Optima-4300DV ("Perkin-Elme", USA) were used for chemical analysis.

The triturated AN was mixed with purified glauconite to obtain a fertilizer granular form. The mixture was heated to 135 °C and rubbed through a stainless steel sieve with a mesh size of 2 x 2 mm. The derived grits were pelletized and dried at a temperature of 50 °C to a residual moisture not more than 3.0%. The glauconite content in the finished granules of glauconitic-ammonium nitrate (GAN) was 20±1%, the nitrogen content was 27.0–27.5%. This components ratio provided the thermostability desired level of the finished fertilizer form [18, 19]. The GAN granules sustained a load of up to 1.5 kg per granule and showed no caking signs when unclosed stored in an enclosed space at a temperature of 20–25 °C for 12 months.

The GAN thermostability was evaluated with thermogravimetry and differential thermal analysis using a differential thermal analyzer DTG-60 ("Shimadzu", Japan). The samples heating was carried out in open-type platinum crucibles (diameter 5.8 mm, height 2.5 mm, weight 136 mg, heat resistance up to 1500 °C). Aluminium oxide was used as the reference. Air was supplied at a 150 ml/min flow rate, heating rate was 10 °C/min. The device was calibrated on indium, tin, and lead.

The AN and GAN phytotoxic properties comparative assessment was carried out by biotesting (seedling method). Artificial soil prepared according to GOST R ISO 22030-2009, was used. The artificial soil (substrate) pH was 6.5±0.2. Calibrated seeds of *Raphanus sativus* var. radicola Pers. (Saxa variety) and *Secale cereale* L. (Falenskaya-4 variety) were used as test-cultures.

The experiment options:

1. Control (substrate without additives).
2. Substrate + AN (0.005% of the substrate weight).
3. Substrate + GAN (0.0062% of the substrate weight).
4. Substrate + glauconite (0.0012%).

The AN addition in an amount of 0.005% of the substrate weight is equivalent to soil application of nitrogen with a mass of 75–80 kg per hectare.

The substrate phytotoxicity was detected by inhibition of test cultures' seed germination and seedlings development. The prepared substrate was loaded into plastic containers and moistened with deionized water. The wet substrate surface was covered with filter paper of grade F (GOST

12026-76), the test-cultures seeds were laid there. The containers with seeds were covered with a microperforated polypropylene film and placed in a thermostat to ensure optimum moisture. Germination was carried out at a temperature of 20±1 °C for 7 days.

The germination energy and rate, seedling vigor and also the seedlings' initial growth intensity were indicators of the fertilizers phytotoxicity assessment [20].

Experimental studies were performed in three replications. The results were statistically processed using the Microsoft Excel program.

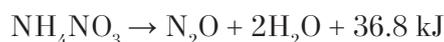
## Results and discussion

The data on the glauconite chemical composition (the content of the basic substance is 96±1%) used for the experiments are presented in Table 1.

In accordance with the chemical analysis, the glauconite inclusion in the AN composition pose no risk of environmental pollution with toxic elements. At the same time, relatively high potassium content (more than 4%) and a number of micronutrients increase the GAN agrochemical value.

The thermogravimetric analysis results indicate that the AN and GAN decomposition begins at the same temperature (Fig.), since the starting temperatures of the mass decrease for both samples coincide. The endothermic peaks, which correspond to the phase transitions at studied samples heating, on the DTA curves are also identical for both samples. Thus, the glauconite addition does not reduce fertilizer thermostability.

Laboratory tests results give reason to assume the possibility of obtaining more homogeneous suspension for granulation due to glauconite powder introduction into AN fusion cake with vigorous stirring (300 rpm and 12 kW drive per 1 m<sup>3</sup> of the mixer reaction volume). In the conditions of sufficient uniformity glauconite will act as a dephlegmatizing addition and an adsorbent released while the AN decomposition to nitrogen oxides. The main AN decomposition product in the fusion cake is nitrous oxide:



However, other products (in addition to N<sub>2</sub>O) are formed while the above-mentioned decomposition, such as nitrogen dioxide NO<sub>2</sub>, that may catalyze the AN thermal decomposition [21]. Nitrogen dioxide binding of due to adsorption may increase GAN thermostability

Table 1

Glauconite chemical composition

Common Name	Formula	Content, mass. share. % *	Method of analysis **
Sodium in terms of oxide	Na <sub>2</sub> O	0.086	AE
Magnesium in terms of oxide	MgO	2.02	AE
Aluminum in terms of oxide	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	4.34	AE
Silicon in terms of oxide	SiO <sub>2</sub>	69.9	AE
Potassium in terms of oxide	K <sub>2</sub> O	4.17	AE
Calcium in terms of oxide	CaO	1.89	AE
Manganese in terms of oxide	MnO	0.0098	AE
Iron total in terms of oxide	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> total	13.3	AE
Loss on ignition	–	3.98 g	gravimetric
Chrome	Cr	279.3	MS, AE
Cobalt	Co	10.6	MS, AE
Copper	Cu	10.9	MS, AE
Zinc	Zn	70.1	MS
Arsenic	As	5.75	MS
Plumbum	Pb	4.58	MS, AE
Cadmium	Cd	0.078	MS, AE
Molybdenum	Mo	6.54	MS

Note: \* – The results for an absolutely dry assay. The definitions error corresponds to the standards of error in determining the mineral raw materials chemical composition in accordance with category III accuracy. GOST 41-08-212-04; \*\* – MS – mass spectral method with inductively coupled plasma, AE – atomic emission method with inductively coupled plasma.

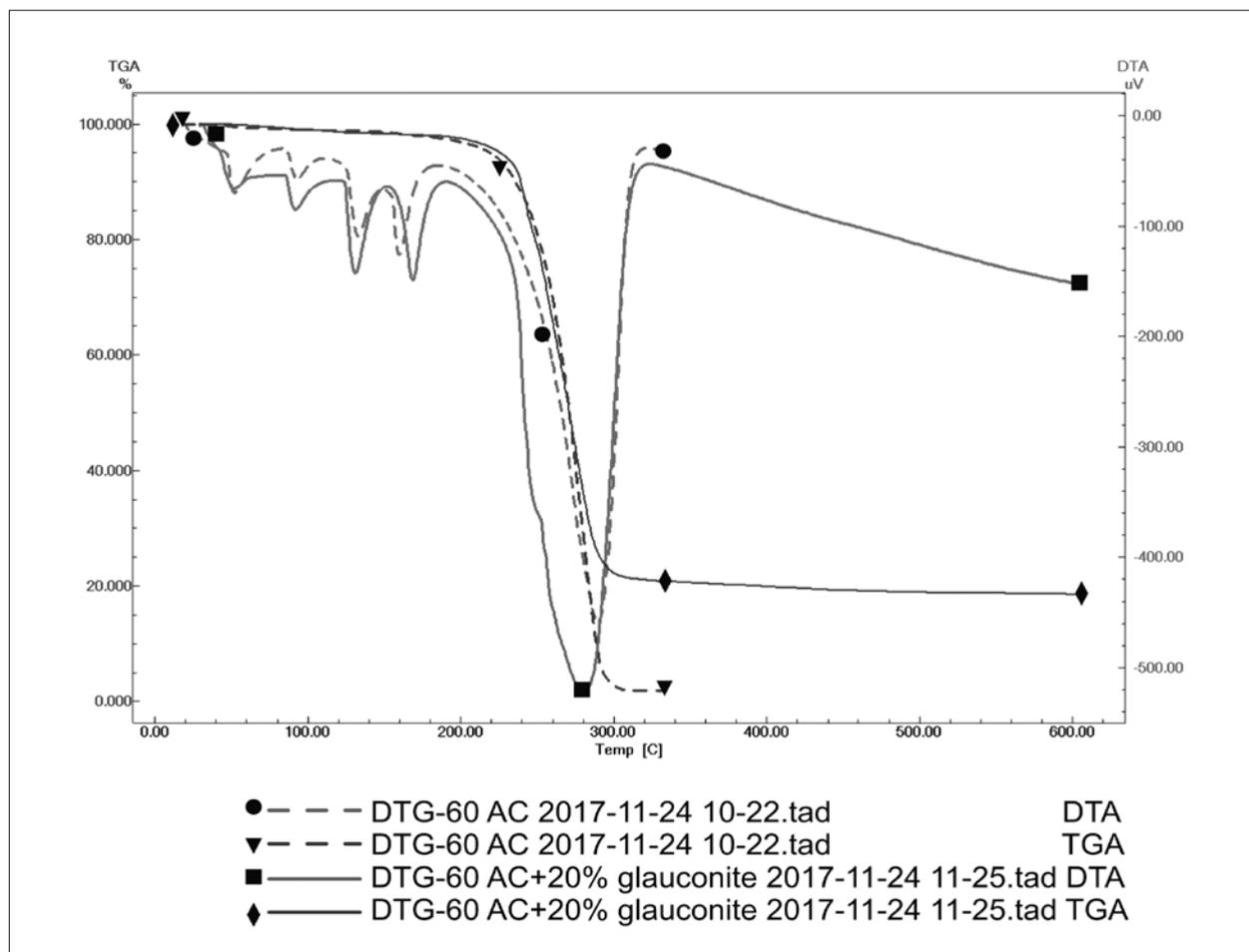


Fig. The thermogravimetric analysis results

Table 2

Index		Results of AN and HAN biotesting			
		Substrate (control)	Substrate + AN 0.005%	Substrate + GAN 0.0062%	Substrate + glauconite 0.0012%
Roots length, cm	1	5.1±0.3	4.9±0.3	4.8±0.5	4.5±0.3
	2	1.2±0.5	2.1±0.1	2.3±0.2	2.2±0.2
Seedlings length, cm	1	8.2±1.1	8.6±1.6	12.5±0.9	6.2±0.7
	2	1.8±0.3	3.6±0.5	3.8±0.4	4.6±0.7
Seedling vigor, %	1	73.3±9.4	82.2±5.1	93.3±5.8	76.7±8.8
	2	30.0±4.7	74.4±12.6	83.3±5.7	78.9±5.1
Germinating energy, %	1	83.3±11.8	84.4±1.9	95.6±1.9	87.8±6.9
	2	75.0±16.5	82.2±15.0	86.7±5.8	91.1±5.1
Germinating capacity, %	1	91.7±7.1	87.8±1.9	98.9±1.9	91.1±3.8
	2	93.3±4.7	93.3±5.8	96.7±3.3	92.2±5.1

Note: 1 – *Secale cereale* L., 2 – *Raphanus sativus* var. *radicula* Pers.

in comparison with the AN. Pilot-industrial tests are required to confirm this assumption. Table 2 shows the results of AN and HAN biotesting.

The obtained results demonstrate radish high sensitivity to the AN and glauconite additives. Radish seeds are characterized by a two-fold increase in such indicators as roots length, seedlings length and seedling vigor when AN adding to the substrate. Practically rye seeds have no reaction for used in the experiment AN and glauconite doses.

The small glauconite doses (55–60 kg/ha) applying into substrate also has a positive effect on radish seeds germination. This effect may be due to the exchange potassium and micronutrients complex in glauconite [22]. The plants' need in potassium is especially great at the early stages of seedlings development; this element is predominantly concentrated in young organs and tissues. The substrate enrichment with glauconite improves the mineral nutrition of seedlings and promotes their development.

The optimal results are observed when applying HAN into the substrate. This experiment option demonstrated higher or at the level of control values (indicator of rye root length) biotested parameters, i. e., the AN and glauconite co-applying into the substrate provides a synergistic effect.

### Conclusion

The conducted studies show the prospects of glauconite using as an additive in the AN composition. Granulated composition containing 80% of AN and 20% of glauconite allows to decrease the nitrogen content in the fertilizer

finished form to 27–28%, which provides the fire-safety and explosion-safety required level and eliminates the risk of pellets caking during storage.

According to the biotesting results, the glauconite addition to the AN composition favorably effects the seeds germination and the seedlings development. The AN enrichment with glauconite promotes an increase in fertilizer's agrochemical efficiency and allows to decrease the fertilizer's application rates and, consequently, to reduce the environmental burden.

### References

1. Anastas P.T., Warner J.C. Green chemistry: theory and practice. Oxford, UK: Oxford University Press, 1998. 135 p.
2. Ammonium Nitrate (AN): 2018 World Market Outlook and Forecast up to 2027 // Market Publisher – Report database [Internet resource] [https://marketpublishers.ru/report/industry/chemicals\\_petrochemicals/ammonia\\_nitrate\\_world\\_market\\_outlook\\_n\\_forecast.html](https://marketpublishers.ru/report/industry/chemicals_petrochemicals/ammonia_nitrate_world_market_outlook_n_forecast.html) (Accessed: 05.07.2018).
3. World fertilizer trends and outlook to 2018 // Food and Agriculture Organization of the United Nations. Rome, 2015. P. 9.
4. Argus – leading independent price agency [Internet resource] <http://www.argus.ru/> (Accessed: 04.07.2018).
5. Wolkowski R.P., Kelling K.A., Bundy L.G. Nitrogen management on sandy soils [Internet resource] <http://corn.agronomy.wisc.edu/Management/pdfs/a3634.pdf> (Accessed: 05.07.2018)
6. Gorbovskiy K.G., Mikhaylichenko A.I., Norov A.M., Malyavin A.S. A study of the qualitative indices of complex NPK-fertilizers with the ratio N:P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>:K<sub>2</sub>O = 1:1:1 containing carbamide // *Uspekhi v khimii i khimicheskoy tekhnologii*. 2012. V. 26. No. 8 (137). P. 14–18 (in Russian).

7. Tyulin V.A., Sutyagin V.P. Improving the efficiency of fertilizers in the environmental agriculture // *Uspekhi sovremennogo yestestvoznaniya*. 2016. No. 11–1. P. 91–95 [Internet resource] <http://natural-sciences.ru/ru/article/view?id=36191> (Accessed: 23.05.2018) (in Russian).
8. Production of ammonium nitrate and calcium ammonium nitrate: Booklet No. 6 of 8. [Internet resource] [http://www.fertilizerseurope.com/fileadmin/user\\_upload/user\\_upload\\_prodstew/documents/Booklet\\_nr\\_6\\_Production\\_of\\_Ammonium\\_Nitrate\\_and\\_Calcium\\_Ammonium\\_Nitrate.pdf](http://www.fertilizerseurope.com/fileadmin/user_upload/user_upload_prodstew/documents/Booklet_nr_6_Production_of_Ammonium_Nitrate_and_Calcium_Ammonium_Nitrate.pdf) (Accessed: 05.07.2018)
9. EU fertilizer market: key graphs [Internet resource] [http://www.fertilizerseurope.com/fileadmin/user\\_upload/publications/statistics\\_publications/Stat\\_website.pdf](http://www.fertilizerseurope.com/fileadmin/user_upload/publications/statistics_publications/Stat_website.pdf) (Accessed: 05.07.2018)
10. Taran A.L., Dolgalev E.V., Taran A.V. Instrument-technological design and economic efficiency of lime-ammonium nitrate production on existing AC-60 and AC-72 units // *Advances in Chemistry and Chemical Technology*. 2007. No. 9 (77). P. 20–22 (in Russian).
11. Thompson G.R., Hower J. The mineralogy of glauconite // *Clays and Clay Minerals*. Pergamon Press. 1975. V. 23. P. 289–300.
12. Nabiyev A.A., Namazov Sh.S., Seytnazarov A.R., Reymov A.R., Beglov A.M., Ayymbetov M.Zh. Carbonate-ammonium nitrate and its using in agricultural production // *Universum: Tekhnicheskiye nauki: elektronnyy nauchnyy zhurnal*. 2017. No. 6 (39). P. 25–32 [Internet resource] <http://7universum.com/ru/tech/archive/item/4903> (Accessed: 05.07.2018) (in Russian).
13. Venig S.B., Serzhantov V.G., Chernova R.K., Doronin S.Yu., Selifonova E.I., Soldatenko E.M. Glauconite of Saratov region, properties, composites based on it, the application // *Butlerovskiye soobshcheniya*. 2014. V. 39. No. 8. P. 17–26 (in Russian).
14. Syrchina N.V., Bogatyreva N.N. Use of glauconite to reduce the negative impact of ammonium nitrate on the properties of soil substrates // *Sovremennyye nauchnyye issledovaniya i razrabotki*. 2018. No. 3 (20). P. 520–525 (in Russian).
15. Syrchina N.V., Kozvonin V.A., Sazanov A.V. Glauconite sands of the Vyatka-Kama deposit and prospects of their practical use in agriculture // *Soils of Russia: yesterday, today, tomorrow: Sbornik statey po materialam Vserossiyskoy s mezhdunarodnym uchastiyem nauchnoy konferentsii, posvyashchennoy Godu ekologii i 90-letiyu so dnya rozhdeniya professora V. V. Tyulina*. Kirov: VyatGU, 2017. P. 108–113 (in Russian).
16. Hall A., Buckley A. Ammonium in glauconite and celadonite // *Mineralogical magazine*. 1991. V. 55. P. 280–282 [Internet resource] [http://www.minersoc.org/pages/Archive-MM/Volume\\_55/55-379-280.pdf](http://www.minersoc.org/pages/Archive-MM/Volume_55/55-379-280.pdf) (Accessed: 16.08.2017).
17. Pyndak V.I., Novikov A.E. Natural ameliorants on the basis of cristobalites and clay soils // *Proceedings of Nizhnevolzskiy Agrouniversity Complex: Science and Higher Vocational Education*. 2015. No. 2 (38). P. 73–76 (in Russian).
18. Marchenko L.A., Mochkova T.V., Kolesnikova V.A., Kozlova A.I. Condition of production and application of liquid mineral fertilizers in agriculture // *Selskokhozyaystvennyye mashiny i tekhnologii*. 2015. No. 6. P. 36–40 (in Russian).
19. Regulation (EC) no 2003/2003 of the European parliament and of the council of 13 October 2003 relating to fertilizers (Technical provisions for ammonium nitrate fertilizers of high nitrogen content) [Internet resource] <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=celex:32003R2003> (Accessed: 16.08.2017).
20. Chesnokova S.M., Chugay N.V. Biological methods for assessing the quality of environmental objects. Part 2. Methods of biotesting. Vladimir: Izdatelstvo Vladimirskego gosudarstvennogo universiteta. 2008. 92 p. (in Russian).
21. Tambiyev P.G., Golik V.I. The Analysis of aspects of manufacture and application of ammoniac saltpeter in mining // *Nauchnyy vestnik Moskovskogo gosudarstvennogo gornogo universiteta*. 2012. No. 1. P. 63–72 (in Russian).
22. Panasin V.I., Ronzhina E.S., Shogenov T.A., Rymarenko D.A. Ecological and agrochemical aspects of using glauconitic sands in agriculture of the Kaliningrad region // *Izvestiya KGTU. Nauchnyy zhurnal*. 2017. No. 47. P. 148–156 (in Russian).

## Биодеструкция полимерных композиционных материалов микроскопическими грибами

© 2018. Э. Х. Сакаева, к. т. н., доцент,  
Ю. В. Куликова, к. т. н., доцент,  
Л. В. Рудакова, д. т. н., профессор,

Пермский национальный исследовательский политехнический университет,  
614990, Россия, г. Пермь, Комсомольский проспект, 29,  
e-mail: elya2182@mail.ru

Показана возможность биологической деструкции полимерных композиционных материалов на примере стеклопластиков на основе фенолоформальдегидной смолы и стекловолокна (марки АГ – 4 и ДСВ), органопластики (марки ОП-ЖА) и углепластиков (УП-Урал-Тр-СФ, УТЗФ2УМН, ЭПАН-2Б) микроскопическими грибами. Степень биодеструкции зависит от состава полимерных композиционных материалов. Наименее стойкими к биодеструкции являются органопластики на основе эпоксидных компонентов. Выявлено, что основными биодеструкторами полимерных композитных материалов являются представители микроскопических грибов *Penicillium chrysogenum*, *P. funiculosum*, *P. cyclopium*, *Aspergillus terreus*, *A. niger*, *A. oryzae*. Уровень стойкости полимерных композиционных материалов к воздействию плесневых грибов по ГОСТ 9.049-91 варьировал от 4 до 5 баллов.

**Ключевые слова:** биодеструкция, микроскопические грибы, грибостойкость, полимерные композиционные материалы.

## Biodegradation of polymeric composite materials by microscopic fungi

© 2018. E. Kh. Sakaeva ORCID 0000-0001-8303-668X,

Yu. V. Kulikova ORCID 0000-0002-0896-4571,

L. V. Rudakova ORCID 0000-0003-3292-8359,

Perm National Research Polytechnic University,  
29, Komsomolskiy Prospect, Perm, Russia, 614990,  
e-mail: elya2182@mail.ru

The objects of research were polymer composite materials (PCM) based on various reinforced materials and binders: fiberglass, organoplastics and carbon plastics. The program of experimental studies included three stages. At the first stage, studies were conducted to identify groups of microorganisms involved in the biodegradation of PCM. The second stage of the research is devoted to determining the generic and species belonging to microorganisms obtained in the first stage. At the third stage, the efficiency of the process of biological destruction of PCM by isolated groups of microorganisms was evaluated. Determination of groups of microorganisms involved in biodegradation was carried out by seeding on liquid nutrient substrates. Fungi resistance was determined in accordance with GOST 9.049-91.

The main groups of microorganisms developing on the surface of composites are representatives of the genus *Penicillium* (*P. chrysogenum*, *P. funiculosum*, *P. cyclopium*) and the genus *Aspergillus* (*A. niger*, *A. terreus*, *A. oryzae*). The evaluation of the fungi resistance showed that the PCM are non-resistance, so the growth of the fungi is estimated at 4 to 5 points. The epoxy matrix is the least fungi resistant, whereas the phenol-formaldehyde matrix more resistant to fungal destructors. The results of the study shows the advisability of biodegradation technology with microscopic fungi using for the utilization of polymeric composite materials based on epoxy and phenol-formaldehyde resins reinforced with glass, carbon or organic fibers.

**Keywords:** biodegradation, mold fungi, fungi resistance, polymeric composite materials.

В мире, в том числе в России, наблюдается резкий рост объёма производства композиционных материалов, которые используются в различных отраслях промышленности. В

2016 г. в мире произведено 8,8 млн тонн композиционных материалов [1]. Производство и эксплуатация изделий из полимерных композиционных материалов (ПКМ) приводит к

образованию существенного объёма отходов, в виде препрегов, обрезки при раскройке изделий, избытков смол и вышедших из употребления изделий. Суммарный мировой объём накопления композиционных материалов, по оценкам экспертов, составляет порядка 4 млн т/год [2]. Размещение данных отходов в окружающей среде приводит к существенной нагрузке ввиду их длительного срока разложения – до 200 лет [3, 4].

В литературных источниках [5–7] имеются отрывочные данные о кинетике процесса биоразложения композиционных материалов в окружающей природной среде. В литературе [4, 8] показана исключительная экологическая и санитарно-гигиеническая опасность ПКМ: при деструкции материалов, армированных углеродным волокном, формируется значительный поток наночастиц, обладающих существенной мобильностью и склонностью накопления в живых организмах [9]. Ряд работ посвящён изучению механизмов и возможных путей деструкции полимерных материалов [10–12], показывающий, что на процесс деструкции в существенной мере влияет тип армирующих волокон, применяемый тип отверждения, форма образцов, микробиологический состав инокулянта, наличие иных источников питания, влажность среды.

Исследования по участию микроскопических грибов в деструкции предварительно стерилизованных образцов композиционных материалов на основе эпоксидной смолы были проведены учёными Гарвардского и Дейтонского университетов [13]. Было установлено, что смесь микроскопических грибов активно использует смолу и частицы угольных волокон в качестве питательного субстрата. Авторами показана эффективность участия в биообращении и деструкции композитных материалов микроскопических грибов *Aspergillus versicolor*, *Cladosporium cladosporioides* и *Chaetomium* sp. в сравнении с бактериями [14].

В то же время неоспоримым преимуществом применения биологических методов для утилизации отходов производства и потребления, в том числе ПКМ, является их энергоэффективность, отсутствие токсичных продуктов разложения.

Анализ проблематики накопления отходов производства и использования изделий из ПКМ, а также обзор литературных данных в области поиска путей биологического разложения данных отходов, позволят говорить об актуальности исследований в данном направлении.

Цель настоящей работы заключалась в оценке возможности использования метода биодеструкции, как способа утилизации отходов полимерных композиционных материалов. На данном этапе исследований было важно оценить возможность использования биологических методов в технологии переработки полимерных композиционных материалов, выявить основные группы микроорганизмов, которые участвуют в процессе биодеструкции ПКМ и оценить их эффективность.

### Объекты и методы исследования

Объектами исследования являлись ПКМ на основе разных наполнителей и связующих. Для эксперимента выбраны следующие ПКМ: стеклопластики, органопластики и углепластики, перечень которых представлен в таблице 1.

Программа экспериментальных исследований по изучению биодеструкции ПКМ включала три этапа. На первом этапе проводились исследования по выявлению групп микроорганизмов, участвующих в деструкции ПКМ. Второй этап исследований посвящён определению родовой и видовой принадлежности микроорганизмов, полученных на первом этапе. На третьем этапе оценивалась эффективность процесса биологической деструкции ПКМ выделенными группами микроорганизмов.

С целью определения групп микроорганизмов, участвующих в биодеструкции ПКМ, использован метод посева на жидкие элективные питательные среды (мясо-пептонный агар (МПА), среда Красильникова, среда Чапека). Для естественного биообращения опытных образцов ПКМ последние помещали в колбу с элективной средой и выдерживали от 5 до 20 сут. По окончании времени экспозиции оценивали рост микроорганизмов, с последующим пересевом на твёрдые питательные среды для дальнейшей идентификации микроорганизмов.

Идентификацию микроорганизмов проводили в соответствии со стандартными методиками и общепринятыми в микробиологической практике методами исследования.

На третьем этапе экспериментальных исследований проводили оценку эффективности биодеструкции ПКМ выделенными на первых этапах микроорганизмами с использованием микологического теста, основанного на определении устойчивости материала к воздействию культур плесневых грибов. Испытания образцов полимерного материала

Таблица 1 / Table 1

Перечень исследованных полимерных композитных материалов  
List of polymer composite materials

№	ПКМ / PCM	Состав ПКМ / PCM composition
1	Стеклопластик АГ-4 ГОСТ 20437 / Fiberglass AG-4 GOST 20437	Стекланные нити / glass threads Феноло-формальдегидное связующее / phenol-formaldehyde binder
2	Стеклопластик ДСВ ГОСТ 17478 / Fiberglass DSV GOST 17478	Стекланные нити / glass threads Феноло-формальдегидное связующее / phenol-formaldehyde binder
3	Органоластик ОП-ЖА / Organoplastic OP-GA	Органоластик Армос / Organogel Armos Эпоксидное связующее / epoxy binder
4	Углекластик УП-Урал-Тр-СФ / Carbon plastic UP-Ural-Tr-SF	Углеродный трикотаж / carbon knitwear Феноло-формальдегидное связующее / phenol-formaldehyde binder
5	Углекластик УТЗФ2УМН / Carbon plastic UTZF2UMN	Углеродная ткань / carbon fabric Феноло-формальдегидное связующее / phenol-formaldehyde binder
6	Углевлокнит ЭПАН-2Б / Carbon fiber EPAN-2B	Углеродное волокно / carbon fiber Феноло-формальдегидное связующее / phenol-formaldehyde binder

на способность служить источником питания для микроскопических и плесневых грибов проводят согласно ГОСТ 9.049-91 и ISO EN 846 [16, 17].

Согласно ГОСТ 9.049-91 продолжительность испытаний при оценке грибостойкости по изменению характерных показателей должна быть не менее 84 сут с промежуточными осмотрами через 30 и 60 сут. Длительность эксперимента составила 210 сут, с промежуточными осмотрами через 30 и 90 сут. В соответствии с ГОСТ 9.048-91 для изучения грибостойкости были использованы 5 образцов ПКМ каждой группы.

Грибостойкость (стойкость к воздействию плесневых грибов) ПКМ оценивали по интенсивности развития грибов на образцах под микроскопом по 6-балльной шкале согласно ГОСТ 9.048-91:

0 баллов – прорастание спор и конидий не обнаружено;

1 балл – в поле зрения проросшие споры и незначительно развитый мицелий;

2 балла – развитый мицелий, возможно спороношение;

3 балла – мицелий и (или) спороношение едва видны невооружённым глазом, но отчётливо видны под микроскопом;

4 балла – невооружённым глазом отчётливо видно развитие грибов, покрывающих менее 25% испытываемой поверхности;

5 баллов – невооружённым глазом отчётливо видно развитие грибов, покрывающих более 25% испытываемой поверхности.

За результат исследований принимали максимальный балл, который установлен не менее чем для трёх образцов.

Степень деструкции ПКМ оценивали по визуальным признакам и с использованием оптической микроскопии.

### Результаты исследований и обсуждение

Первый этап экспериментальных исследований позволил получить накопительную культуру микроорганизмов, участвующих в естественном биообрастании опытных образцов ПКМ в элективных накопительных культурах. Наилучший рост микроорганизмов наблюдался в опытных образцах с питательной средой Чапека, в которой процесс биодegradации ПКМ ускоряется за счёт присутствия глюкозы, как легкодоступного источника углерода. Интерес представлял мицелий колоний грибов, образовавшихся как на поверхности среды, так и на поверхности ПКМ. Рост микроскопических грибов с развитием спороношения отмечался во всех опытных образцах, что свидетельствует о том, что ПКМ содержат питательные вещества, обеспечивающие развитие грибов. При этом стоит отметить, что интенсивность развития микроскопических грибов различна на разных видах композитов.

На средах МПА и Красильникова активного роста микроорганизмов не наблюдали. Поэтому второй этап исследований посвящён выделению и идентификации микроорганиз-



**Рис. 1.** Микроскопические грибы р. *Penicillium*, выделенные из накопительной культуры на среде Чапека: а – колонии на среде Чапека; б – микроскопическая картина  
**Fig. 1.** Microscopic fungi of g. *Penicillium* selected from accumulative culture on Chapek substratum: a – colony on Chapek substratum; b – microscopic picture

**Таблица 2 / Table 2**

Оценка грибостойкости материала по степени развития плесневых грибов  
 Evaluation of material fungi resistance according to the degree of development of mold fungi

Образец ПКМ Sample of PCM	Микроскопические грибы, выявленные на поверхности опытных образцов ПКМ Microscopic fungi found on the surface prototypes PCM	Степень развития грибов (балл) Degree of development of fungi (score)
Стеклопластик АГ- 4 ГОСТ 20437 Fiberglass AG-4 GOST 20437	<i>Aspergillus terreus</i> , <i>Penicillium chrysogenum</i> , <i>P. funiculosum</i>	4
Стеклопластик ДСВ ГОСТ 17478 Fiberglass DSV GOST 17478	<i>A. niger</i> , <i>A. oryzae</i> , <i>P. chrysogenum</i>	4
Органопластик ОП-ЖА Organoplastic OP-GA	<i>P. chrysogenum</i> , <i>A. terreus</i> , <i>A. niger</i> , <i>P. cyclopium</i>	5
Углепластик УП-Урал-Тр-СФ Carbon plastic UP-Ural-Tr-SF	<i>A. terreus</i> , <i>P. funiculosum</i> , <i>P. chrysogenum</i>	4
Углепластик УТЗФ2УМН Carbon plastic UTZF2UMN	<i>A. terreus</i> , <i>Trichoderma viride</i> , <i>P. funiculosum</i>	4
Углеволокнит ЭПАН-2Б Carbon fiber EPAN-2B	<i>P. chrysogenum</i> , <i>P. cyclopium</i> , <i>A. niger</i>	4

мов, полученных в накопительной культуре на среде Чапека.

Основными группами микроорганизмов, развивающимися на среде Чапека, являлись микроскопические грибы, преобладающими родами которых были *Penicillium* и *Aspergillus*. Также в одной из накопительных культур с ПКМ (Углепластик УТЗФ2УМН) выделены грибы р. *Trichoderma*. На рисунке 2 представлены микроскопические грибы, выделенные на поверхности ПКМ из накопительной культуры.

Идентификация выделенных микроскопических грибов позволила определить шесть преобладающих видов, относящихся к двум родам *Penicillium* и *Aspergillus*: *P. chrysogenum*, *P. funiculosum*, *P. cyclopium*, *A. niger*, *A. terreus*, *A. oryzae*.

В накопительной культуре, помимо микроскопических грибов, выделены бактерии *Bacillus* sp. и *Pseudomonas* sp.

Также при изучении микробной сукцессии в накопительной культуре отмечены актиномицеты, которые используют минеральные формы азота. Выделены актиномицеты родов *Micromonospora* и *Streptomyces*. Актиномицеты способны, как и грибы, подвергать деструкции сложногидролизуемые органические субстраты.

Третий этап исследований был посвящён оценке биодеструкции ПКМ под действием микроскопических грибов. В соответствии с ГОСТ 9.048-91 композитный материал считается грибостойким, если степень роста на нём грибов не превышала 2 баллов. Результаты анализа показали, что ПКМ негрибостойкие,

так как рост грибов оценивается в 4–5 баллов. Полученные результаты представлены в таблице 2.

Данные таблицы показывают, что интенсивность развития микроскопических грибов на поверхности образцов ПКМ непосредственно связана с химическим составом композита, например, наполнитель органожгут является источником углерода для микроскопических грибов. Кроме этого, в зависимости от структуры полимерной матрицы, наблюдается устойчивость к действию биодеструкторов. Наиболее доступной является эпоксидная матрица, тогда как феноло-формальдегидная матрица оказывается более устойчивой к воздействию грибов-деструкторов.

В таблице 2 также представлены данные о видовом составе грибов, рост которых наблюдали на поверхности опытных образцов ПКМ в процессе экспериментальных исследований (на 28 сут).

В процессе деструкции ПКМ участвовали представители микроскопических грибов родов *Aspergillus* и *Penicillium*. Выявлены представители рода *Penicillium* (*P. chrysogenum*, *P. funiculosum*, *P. cyclopium*), которые характеризовались интенсивным развитием мицелия и обильным спороношением. Данные виды развивались почти на всех образцах ПКМ в течение всего периода биодеградации (210 сут).

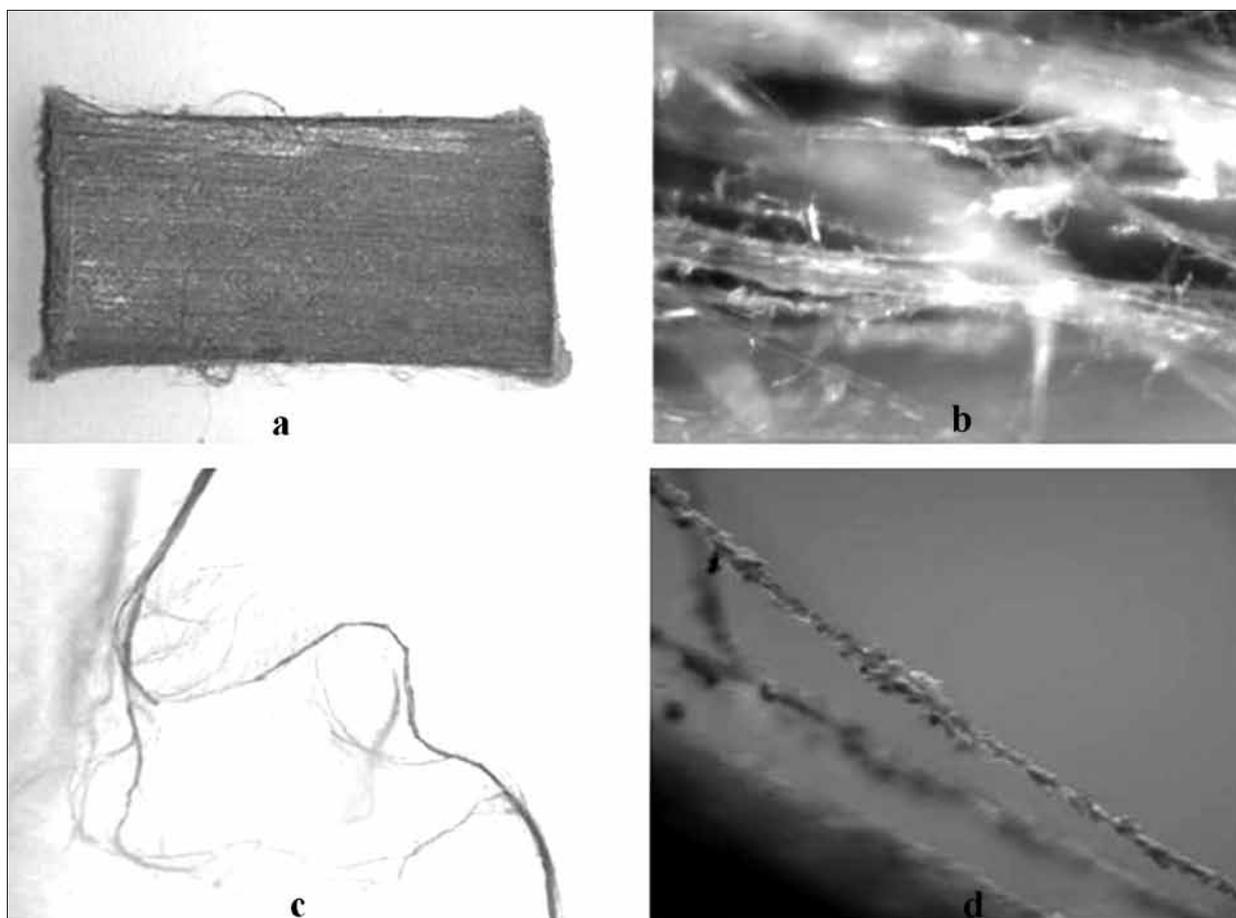
На поверхности образцов композитов на 90 сут экспозиции зафиксированы отдельные очаги мицелия *A. niger*. Также отмечены представители *A. terreus*, которые выявлены на многих образцах ПКМ, а также *A. oryzae*, который придавал красный оттенок стеклопластику ДСВ на ранних этапах экспонирования.

По окончании 210 сут экспозиции образцов ПКМ микроскопическими грибами, оценена степень деструкции опытных вариантов (визуально и с помощью стереомикроскопа).

Таблица 3 / Table 3

Результаты визуального контроля образцов при биодеградации микроскопическими грибами  
Visual control results of composites particles during biodegradation with microscopic fungi

Образец ПКМ Sample of PCM	Описание изменений образцов ПКМ после эксперимента Description of change in PCM samples after experiment	
	90 сут экспозиции 90 days of exposition	210 сут экспозиции 210 days of exposition
Стеклопластик АГ-4 ГОСТ 20437 Fiberglass AG-4 GOST 20437	Изменение оттенка образца (покраснение), разрыхление материала и появление отдельных элементов стеклонитей Changing the hue of the sample (redness), and appearance of individual elements of glass	Разрыхление материала, большое количество высвободившегося стеклонитей Decondensation of the material, there are many free glass
Стеклопластик ДСВ ГОСТ 17478 Fiberglass DSV GOST 17478	Без изменений Unchanged	Высвобождение стеклонитей по всей поверхности образца Release of glass on the surface of the sample
Органопластик ОП-ЖА Organoplastic OP-GA	Наличие развитого мицелия грибов There are developed mycelium of fungi	Размягчение материала, обрастание мицелием грибов всей поверхности материала Softening of the material, there are developed mycelium of fungi
Углепластик УП-Урал-Тр-СФ Carbon plastic UP-Ural-Tr-SF	Без изменений Unchanged	Нарушение структуры ПКМ (крошится), высвобождение волокон ткани Violation of the structure of PCM (to crumble), release of the fibers
Углепластик УТЗФ2УМН Carbon plastic UTZF2UMN	Размягчение материала, высвобождение волокон ткани Softening of the material, release of the fibers	Материал рыхлый, высвобождение волокон ткани Loose material, release of the fibers
Углеволокнит ЭПАН-2В Carbon fiber EPAN-2B	Расслаивание материала Delamination of the material	Фактура материала осталась прежней, наблюдается расслаивание The structure of the former, there are delamination



**Рис. 2.** Внешний вид органопластика ОП-ЖА: а – внешний вид до начала эксперимента, б – микроскопическая картина поверхности (увеличение 20 x 6,3) до начала эксперимента, с – внешний вид после экспонирования в течение 7 месяцев, d – микроскопическая картина поверхности (увеличение 20 x 6,3) после экспонирования в течение 7 месяцев

**Fig. 2.** Appearance of organic polymer composite OP-ZhA type: a – appearance before the beginning of the experiment, b – microscopic picture of the surface (magnification 20 x 6.3) before the experiment start, c – appearance after exposure for 7 months, d – microscopic picture of the surface (magnification 20 x 6.3) after exposure for 7 months

В таблице 3 представлены данные по визуальной оценке образцов ПКМ, подвергшихся биодеструкции микроскопическими грибами.

На рисунке 2 представлен образец органопластика ОП-ЖА, подвергшийся биодеструкции микроскопическими грибами в течение 210 суток.

Эксперимент по исследованию воздействия на образцы ПКМ микроскопических грибов позволил выявить качественные показатели деструкции. На первой стадии процесса деструкции происходит водопоглощение жидкой среды материалом, размягчение материала повышает доступность его к воздействию микроорганизмов. На второй стадии осуществляется прикрепление микроскопических грибов к поверхности полимерного композита и частичное проникновение мицелия вглубь материала. Далее происходит интенсивное

размножение микроскопических грибов, что свидетельствует об использовании микромицетами наполнителя как источника питания.

### Заключение

На основании проведённых исследований по биодеструкции полимерных композитных материалов можно сделать следующие выводы:

1. Полимерные композитные материалы подвержены деструкции микроскопическими грибами, при этом стойкость к воздействию плесневых грибов по ГОСТ 9.049-91 варьировала от 4 до 5 баллов по 6-балльной шкале. Наименее стойкими к биодеструкции являются органопластики на основе эпоксидного связующего.

2. Основными биодеструкторами полимерных композитных материалов являются *Penicillium* sp. и *Aspergillus* sp.: *P. chrysogea*

*num, P. funiculosum, P. cyclospium, A. terreus, A. niger, A. oryzae.*

3. Визуальная оценка степени деструкции ПКМ показала существенное изменение механических свойств материалов через 210 сут проведения эксперимента (размягчение, высвобождение волокон, расслаивание) при том, что в большинстве образцов на 90 сут эксперимента существенных изменений не отмечено.

Результаты исследования свидетельствуют о целесообразности использования технологии биодеструкции с использованием микроскопических грибов для утилизации полимерных композиционных материалов на основе эпоксидных и фенолформальдегидных смол, армированных стеклянными, угольными или органическими волокнами. Наиболее эффективно биологический метод может быть применён при переработке органопластиков с целью освобождения наполнителя (органожгута).

*Работа выполнена в рамках государственного задания Министерства образования и науки РФ в рамках мероприятия «Инициативные научные проекты», код заявки 5.9729.2017/8.9.*

### Литература

1. ПК «ИнПолимер» [Электронный ресурс] <http://www.inpolimer.ru/news/217/dolya-rossii-v-mirovom-rynke-kompozitov-sostavit-1/> (Дата обращения: 20.06.2018).
2. Mazumdar S., Karthikeyan D., Pichler D., Benevento M., Frassine R. State of the composites industry report for 2017 // *Composites Manufacturing*. 2017. January 2. [Электронный ресурс] <http://compositesmanufacturingmagazine.com/2017/01/composites-industry-report-2017/4/> (Дата обращения: 20.06.2018).
3. Iwańczuk A., Kozłowski M., Łukaszewicz M., Jabłoński S. Anaerobic Biodegradation of polymer composites filled with natural fibers // *Journal of Polymers and the Environment*. June 2015. V. 23. No. 2. P. 277–282.
4. Bankim C.R., Rajesh K.P., Dinesh K.R. Fibrous polymeric composites: environmental degradation and damage. Boca Raton, CRC Press, 2018. 222 p.
5. Карамова Н.С., Надеева Г.В., Багаева Т.В. Методы исследования и оценки биоповреждений, вызываемых микроорганизмами: Учебно-методическое пособие. Казань: Изд-во Казанского университета, 2014. 36 с.
6. Кряжев Д.В., Смирнов В.Ф., Мочалова А.Е., Смирнова О.Н., Захарова Е.А., Зотов К.А., Смирнова Л.А. Устойчивость композиционных материалов на основе синтетических и природных полимеров к действию микромицетов в природных условиях // *Вестник*

Нижегородского университета им. Н.И. Лобачевского. 2010. № 2–2. С. 536–540.

7. Levinskait L. Biodegradation potential of fungi penicillium isolated from synthetic polymeric materials // *Journal of Environmental Engineering (United States)*. 2018. V. 144. No. 7. P. 51–58.
8. Bankim R. Environmental durability of fibrous polymeric composites // *Eighteenth International Symposium on Processing and Fabrication of Advance Materials [PFAM XVIII]*. Japan, Sendai, 2009. 10 p.
9. Fadeel B., Shvedova A., Kagan V. Interactions of carbon nanotubes with the immune system: focus on mechanisms of internalization and biodegradation // *Nanomedicine – Basic and Clinical Applications in Diagnostics and Therapy*. 2011. No. 2. P. 80–87.
10. Shu X.-L., Shi Q.-S., Feng J., Ouyang Y.-S., Chen Y.-B. Progress in research of microbiological deterioration of polymeric materials // *Corrosion and Protection*. 2008. No. 29. P. 499–502.
11. Kawai F. The biochemistry and molecular biology of xenobiotic polymer degradation by microorganisms // *Bioscience. Biotechnology. Biochemistry*. 2010. No. 74 (9). P. 1743–1759.
12. Zheng Y., Yanful E.K., Bassi A.S. A Review of plastic waste biodegradation // *Critical reviews in biotechnology*. 2005. No. 25 (4). P. 243–250.
13. Gu Ji. D., Lu C., Mitchell R., Thorp K., Crasto A. Fungal degradation of fiber-reinforced composites materials // *Materials performance*. 1997. No. 36. P. 37–42.
14. Gu Ji.D. Microbial deterioration and degradation of synthetic polymer materials: recent research advances // *International biodeterioration and biodegradation*. 2003. No. 52. P. 69–91.
15. ГОСТ 9.049-91. Единая система защиты от коррозии и старения (ЕСЗКС). Материалы полимерные и их компоненты. Методы лабораторных испытаний на стойкость к воздействию плесневых грибов.
16. *Plastics – Evaluation of the action of microorganisms: ISO 846:1997*. Berlin: ISO/TC61/SC 6 Ageing, chemical and environmental resistance, 1998. 22 p.
17. Белик Е.С., Рудакова Л.В. Оценка эффективности деструкции биоразлагаемых полимерных материалов // *Градостроительная и отраслевая экология*. 2012. Т. 1. № 5. С. 78–88.
18. Ерофеев В.Т., Богатов А.Д., Богатова С.Н., Казначеев С.Н., Смирнов В.Ф. Влияние эксплуатационной среды на биостойкость строительных композитов // *Инженерно-строительный журнал*. 2012. № 7. С. 23–31.
19. Соломатов В.И., Ерофеев В.Т., Смирнов В.Ф., Семичева А.С., Морозов Е.А. Биологическое сопротивление материалов. Саранск: Изд-во Мордовского государственного ун-та, 2001. 195 с.
20. Полякова Е.А., Высоковский А.С., Коротнева И.С. Биодegradуемый композиционный материал на основе природных и синтетических полимеров // VII Конкурс проектов молодых учёных: тезисы докладов. М.: РХТУ им. Д.И. Менделеева, 2013. С. 32.

## References

1. PK «InPolimer» [Internet resource] <http://www.inpolimer.ru/news/217/dolya-rossii-v-mirovom-rynke-kompozitov-sostavit-1/> (Accessed: 20.06.2018).
2. Mazumdar S., Karthikeyan D., Pichler D., Benevento M., Frassine R. State of the composites industry report for 2017 // *Composites Manufacturing*. 2017. January 2. [Internet resource] <http://compositesmanufacturingmagazine.com/2017/01/composites-industry-report-2017/4/> (Accessed: 20.06.2018).
3. Iwańczuk A., Kozłowski M., Łukaszewicz M., Jabłoński S. Anaerobic Biodegradation of polymer composites filled with natural fibers // *Journal of Polymers and the Environment*. June 2015. V. 23. No. 2. P. 277–282.
4. Bankim C.R., Rajesh K.P., Dinesh K.R. Fibrous polymeric composites: environmental degradation and damage. Boca Raton, CRC Press, 2018. 222 p.
5. Karamova N.S., Nadeeva G.V., Bagaeva T.V. Methods of research and evaluation of biological damage caused by microorganism: Educational and methodical manual. Kazan': Izd-vo Kazanskogo universiteta, 2014. 36 p. (in Russian).
6. Kryazhev D.V., Smirnov V.F., Mochalova A.E., Smirnova O.N., Zakharova E.A., Zotov K.A., Smirnova L.A. Stability of synthetic and natural polymer composite materials to the action of micromycetes under natural conditions // *Vestnik Nizhegorodskogo universiteta im. N.I. Lobachevskogo*. 2010. No. 2–2. P. 536–540. (in Russian).
7. Levinskait L. Biodegradation potential of fungi penicillium isolated from synthetic polymeric materials // *Journal of Environmental Engineering (United States)*. 2018. V. 144. No. 7. P. 51–58.
8. Bankim R. Environmental durability of fibrous polymeric composites // *Eighteenth International Symposium on Processing and Fabrication of Advance Materials [PFAM XVIII]*. Japan, Sendai, 2009. 10 p.
9. Fadeel B., Shvedova A., Kagan V. Interactions of carbon nanotubes with the immune system: focus on mechanisms of internalization and biodegradation // *Nanomedicine – Basic and Clinical Applications in Diagnostics and Therapy*. 2011. No. 2. P. 80–87.
10. Shu X.-L., Shi Q.-S., Feng J., Ouyang Y.-S., Chen Y.-B. Progress in research of microbiological deterioration of polymeric materials // *Corrosion and Protection*. 2008. No. 29. P. 499–502.
11. Kawai F. The biochemistry and molecular biology of xenobiotic polymer degradation by microorganisms // *Bioscience. Biotechnology. Biochemistry*. 2010. No. 74 (9). P. 1743–1759.
12. Zheng Y., Yanful E.K., Bassi A.S. A Review of Plastic Waste Biodegradation // *Critical Reviews in Biotechnology*. 2005. No. 25 (4). P. 243–250.
13. Gu Ji.D., Lu C., Mitchell R., Thorp K., Crasto A. Fungal degradation of fiber-reinforced composites materials // *Materials performance*. 1997. No. 36. P. 37–42.
14. Gu Ji.D. Microbial deterioration and degradation of synthetic polymer materials: recent research advances // *International biodeterioration and biodegradation*. 2003. No. 52. P. 69–91.
15. GOST 9.049-91. Unified system of corrosion and ageing protection. Polymer materials and their components. Methods of laboratory tests for mould resistance (in Russian).
16. Plastics – Evaluation of the action of microorganisms. (1998). ISO 846:1997. Berlin: ISO/TC61/SC 6 Ageing, chemical and environmental resistance. 22 p.
17. Belik E.S., Rudakova L.V. Investigation of destruction biodegradable polymeric materials // *Gradostroitelnaya i otraslevaya ekologiya*. 2012. V. 1. No. 5. P. 78–88 (in Russian).
18. Erofeev V.T., Bogatov A.D., Bogatova S.N., Kaznacheev S.N., Smirnov V.F. The influence of the operating environment on the biostability of building composites // *Inzhenerno-stroitelnyy zhurnal*. 2012. No. 7. P. 23–31 (in Russian).
21. Solomatov V.I., Erofeev V.T., Smirnov V.F., Semicheva A.S., Morozov E.A. Biological resistance of materials. Saransk: Izd-vo Mordovskogo gos. un-ta, 2001. 195 p. (in Russian).
22. Polyakova E.A., Vysokovskiy A.S., Korotneva I.S. Biodegradable composite material based on natural and synthetic polymers // *VII Konkurs proektov molodykh uchenykh: tezisy dokladov*. Moskva: RKhTU im. D.I. Mendeleeva, 2013. P. 32 (in Russian).

## Исследование процессов миграции и трансформации смазочно-охлаждающих жидкостей в почве урбанизированной территории

© 2018. Л. М. Щуклина<sup>1</sup>, аспирант, Г. М. Батракова<sup>1</sup>, д. т. н., доцент,  
Т. В. Нурисламова<sup>1,2</sup>, д. б. н., профессор,

<sup>1</sup>Пермский национальный исследовательский политехнический университет,  
614990, Россия, г. Пермь, Комсомольский проспект, 29,

<sup>2</sup>Федеральный научный центр медико-профилактических технологий  
управления рисками здоровью населения,  
614045, Россия, г. Пермь, ул. Монастырская, 82,  
e-mail: eco@pstu.ru

Актуальность работы определяется требованиями экологической безопасности при строительстве на территориях с выявленным техногенным загрязнением почв. В работе рассматривается применение хромато-масс-спектрометрии в исследовании загрязнённого грунта с целью идентификации продуктов трансформации в природных условиях многокомпонентных рецептур смазочно-охлаждающих жидкостей. Выполнена идентификация и поиск по масс-спектрам компонентного состава продуктов трансформации индустриального масла, предложено маркерное соединение. Показана возможность идентификации на основании регистрации масс-спектров ионов химических соединений, определена структура и элементный состав. Поиск характеристических ионов органических соединений выполнялся с помощью банка библиотеки масс-спектральных данных. Установлены характеристические ионы (основной и подтверждающие ионы), характеризующие структуру химических соединений и определено хроматографическое время удерживания. Для оценки миграции маркерного соединения выполнено его количественное определение методом капиллярной газовой хроматографии в пробе воздуха и пробах загрязнённого грунта; исследованы образцы грунта у основания ёмкости, образцы маслоудерживающей ткани и фильтрат из поддона.

Результаты исследования направлены на обоснование методики оценки загрязнения промышленных площадок смазочно-охлаждающими жидкостями с учётом трансформации органического загрязнителя и рекомендаций по рекультивации загрязнённых технозёмов.

**Ключевые слова:** смазочно-охлаждающие жидкости, маркер, летучие органические соединения (ЛОС), толуол, хромато-масс-спектрометрические исследования, характеристические ионы, масс-спектр, почвогрунт, технозём.

## Study of migration and transformation of greasing and cooling fluids in the soil of urbanized area

© 2018. L. M. Shchuklina<sup>1</sup> ORCID: 0000-0003-4096-9556<sup>1</sup>

G. M. Batrakova<sup>1</sup> ORCID: 0000-0002-4549-517X<sup>1</sup>

T. N. Nurislamova<sup>1,2</sup> ORCID: 0000-0002-2344-3037<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Perm National Research Polytechnic University,  
29, Komsomolskiy Prospect, Perm, Russia, 614990,

<sup>2</sup>Federal Center Scientific Center for Medical and  
Preventive Health Risk Management Technologies,  
82, Monastyrskaya St., Perm, 614045,

e-mail: eco@pstu.ru

Relevance of the work is determined by the requirements of ecological safety in the industrial and civil construction in areas with identified technogenic soils' pollution. The paper considers the use of chromatography-mass spectrometry in a study of polluted soil in order to identify transformation products under natural conditions of multicomponent formulas of lubricating fluids. The identification and search by mass spectra of the component composition of the industrial oil transformation products was carried out, a marker compound is proposed. The possibility of structure and element composition identification on the basis of registration of mass spectra of chemical compounds is shown. The search for characteristic ions of organic compounds was carried out using a bank of the mass-spectral data library. The characteristic

ions (basic and sustaining) describing the structure of chemical compounds and the chromatographic retention time are determined. To assess the migration of the marker compound, a quantitative determination of the marker compound was made by capillary gas chromatography in air and polluted soils samples. Soil samples at the bottom of the vessel, samples of oil-retaining tissue and filtrate from the pallet were examined.

The results of the research are aimed at justifying the method for assessing the contamination of industrial sites with lubricating fluids, taking into account the transformation of the organic pollutant and recommendations for the recultivation of polluted technozems.

**Keywords:** lubricating fluids, marker, volatile organic compound, toluene, chromatography-mass spectrometry study, characteristic ions, mass spectrum, soil, technozem.

На завершающем этапе жизненного цикла промышленных объектов нефтехимической, химической отрасли, предприятий специального машиностроения при их полной ликвидации и реконструкции устаревших производств недостаточно внимания уделяется проблемам снижения загрязнения почвы и подстилающих грунтов. Почвы и грунт на территории длительно функционировавших промышленных предприятий могут быть сильно загрязнены, а в процессе подготовки и проведения строительных работ могут измениться условия, определяющие их способность удерживать загрязнение [1, 2].

В мировой практике известен опыт освоения производственных территорий ранее занятых промышленными предприятиями, например, проекты санации полигонов захоронения отходов, проекты нового строительства на территориях военных заводов, портовых терминалов, устаревших транспортных узлов в странах Европы и Америки [3–6]. Опыт ликвидации производств специальной химии имеется и в России, когда в рамках Федеральной программы химической и биологической безопасности ликвидировались производства химического оружия, взрывчатых веществ, мазутные хозяйства. Проекты реновации промышленной территории в обязательном порядке включали работы по исследованию загрязнённой почвы и техногенных поверхностных образований [7].

Почвы промышленных территорий отличаются от природных почв по генезису, строению и механизмам влаго- и массобмена. Физико-механические характеристики почв влияют на диффузионную проницаемость, изменение температурно-влажностного режима и аэрация при освоении площадки влияют на процессы трансформации и миграции загрязнения.

В научно-технической литературе недостаточно сведений о миграции и трансформации в почвенных условиях органических соединений из номенклатуры смазочно-охлаждающих жидкостей. Для обоснования

способа восстановления почв актуально изучить изменение состава загрязнителя (СОЖ) и факторы, влияющие на процессы массопереноса этого типа загрязнения.

Смазочные охлаждающие жидкости – обобщённое наименование рецептур на основе композиций из минеральных масел, жирных кислот и их эфиров, поверхностно-активных веществ, гидроксида щелочного металла и др. К номенклатуре СОЖ относятся моторные, промышленные масла и гидравлические жидкости, составы для обработки металлов. Современные СОЖ содержат антикоррозионные, противоизносные, противозадирные, биоцидные добавки и присадки. Наиболее распространённые СОЖ представляют собой нефтяные масла и их 3–10% водные эмульсии. Компоненты СОЖ имеют разную степень токсичности, ряд соединений масляных фракций характеризуется канцерогенностью [8–10]. Для снижения неблагоприятного воздействия на объекты окружающей среды составы СОЖ регламентированы, работы с их использованием жёстко контролируются. Основное внимание уделяется снижению риска профессиональных заболеваний, нормированию и контролю допустимого загрязнения воздуха в рабочей зоне, меры по предотвращению загрязнения водных объектов при транспортировке и хранении СОЖ, меры противопожарной защиты и условия санитарно-эпидемиологического благополучия работающих [10].

К мероприятиям обеспечения экологической безопасности относится требование учёта объёмов использования и отходов загрязнённых СОЖ. Распространённым методом изолирования проливов и утечки СОЖ является отсыпка загрязнённого участка нейтральным по отношению к загрязнителю материалом (песчано-гравийной смесью, перемещённым незагрязнённым грунтом и др.). Серьёзную опасность для окружающей среды представляют пролив с образованием линз загрязнения, из которых маслоподобная жидкость может распространяться по профилю зоны аэрации

Таблица 1 / Table 1

Показатели для оценки уровня загрязнения почв органическими соединениями Indicators for the assessment of soil pollution by organic compounds

Органические соединения Organic compounds	Критерии экологической оценки загрязнения почв и грунтовых вод / Indicators for the assessment of soil and groundwater pollution
Ароматические углеводороды Aromatic hydrocarbons	сумма моноароматических углеводородов, бензол, толуол, ксилол, этилбензол / sum of monoaromatic hydrocarbons, benzene, toluene, xylene, ethylbenzene
Алифатические галоген-замещённые углеводороды Aliphatic halogen-substituted hydrocarbons	летучие галогенозамещённые углеводороды, летучие хлорированные углеводороды, монохлорэтен / volatile halogen-substituted hydrocarbons, volatile chlorinated hydrocarbons, monochlorethene
Ароматические галоген-замещённые углеводороды Aromatic halogen-substituted hydrocarbons	сумма полихлорированных бифенилов, хлорбензолы, хлорфенолы / sum of polychlorinated biphenyl, chlorobenzenes, chlorophenols
Фенолы / Phenols	фенолы в целом, фенолы летучие под водяным паром, метанол, изопропанол, гликоль / total phenols, volatile phenols under water vapour
Нефть / Oil	нефтяные углеводороды / oil hydrocarbons

до водоносных горизонтов, что приведёт к обострению экологической проблемы [10–16].

При оценке химического загрязнения почв бывших промышленных территорий используются методические подходы для оценки загрязнения почв и грунтовых вод, рекомендованные в Германии и Голландии (СНиП 11-102, приложение А). Предполагаемое техногенное загрязнение почвы требует предварительной идентификации класса органических соединений и последующей количественной оценки индивидуальных веществ (табл. 1).

Цель работы – исследование трансформации и миграции органических соединений из состава СОЖ в натурном эксперименте.

### Объекты и методы исследований

Объектом исследования являлся насыпной грунт (технозём), загрязнённый СОЖ. В качестве широко распространённого состава СОЖ использовали безприсадочное индустриальное масло И-40А общего назначения, которое представляет дистиллятное масло или смесь дистиллятного масла из сернистой и малосернистой нефти после очистки (ГОСТ 20799). Для моделирования процесса разлива СОЖ поставлен эксперимент, в основу которого положен метод экспериментальной заливки почвы известным количеством загрязнителя [17]. Ёмкость объёмом 200 литров с перфорированным дном заглублена в грунт, нижняя часть ёмкости заполнена гравием, на

гравий уложена маслоулавливающая ткань (рис. 1). Ёмкость не была изолирована от внешней среды, установлена на поддон для сбора фильтрационной воды. Заполнение ёмкости насыпным грунтом выполнено после монтажа установки. Эксперимент длился в течение календарного года, отбор проб загрязнённого грунта из ёмкости выполнялся 1 раз в квартал. За исключением зимнего периода, дренажную воду (фильтрат) из поддона анализировали после демонтажа установки.

Программа эксперимента заключалась в следующем: на начальном этапе выполнена идентификация и поиск по масс-спектрам компонентного состава продуктов трансформации индустриального масла и выявления маркерного соединения; далее выполнено количественное определение маркерного соединения методом капиллярной газовой хроматографии в пробах загрязнённого грунта при послойном отборе проб из ёмкости (0–18; 18–38 и 40–60 см) и в пробах почвенного воздуха; после демонтажа установки исследованы образцы грунта у основания ёмкости, образцы маслоудерживающей ткани и фильтрат из поддона.

Состав индустриального масла исследован методом хромато-масс-спектрометрии (ГХ-МС) на газовом хроматографе Agilent 7890А (USA) с квадрупольным масс-селективным детектором (MCD) 5975С. Режим ионизации электронным ударом при 70 эВ. Для исследований использовали капиллярную колонку серии HP-FFAP длиной 30 метров, внутрен-

ним диаметром 0,25 мм и толщиной плёнки неподвижной фазы 0,25 мкм. Параметры ГХ-МС и МСД: температура колонки 200 °С, температура испарителя – 270 °С, ток эмиссии 70 эВ, режим сканирования толуола по масс-селективному иону.

Идентификация химических соединений выполнена по масс-спектрам с помощью баз данных и компьютерного библиотечного поиска, которая позволила установить химический состав образцов газовой смеси; основные и подтверждающие ионы химических соединений; время удерживания химических соединений; химическую структуру обнаруженных химических соединений [18–19].

Для расшифровки результатов масс-спектрометрического анализа использованы библиотеки масс-спектральных данных NIST 08.L (около 300 000 масс-спектров), WILEY275.L (около 450 000 масс-спектров) и PMW\_TOX2.L для ручной идентификации [20].

Для количественного определения летучих органических соединений (ЛОС) и маркерного соединения проведены дополнительные исследования методом капиллярной газовой хроматографии в соответствии с методикой РД 52.04.186-89 [21]. Исследование воздуха выполнено на хроматографе «Кристалл-5000»

с использованием детектора ионизации в пламени и капиллярной колонки HP-FFAP 50 м x 0,32 мм x 0,5 мкм. По данной методике также определяли количественное содержание ЛОС в пробах почвенного воздуха.

Анализ проб почвы выполнен по методике ГХ-МС определения летучих органических веществ в почве и отходах (МУК 4.1.1061-01). Для исследования фильтрата использованы методические указания по газохроматографическому определению ароматических углеводородов в воде (МУК 4.1.650-96). Методики обеспечивали выполнение измерений с погрешностью, не превышающей ±20% при доверительной вероятности 0,95.

### Результаты и обсуждение

Диффузионная проницаемость разных типов почв и грунта зависит от морфологических особенностей и физико-химических свойств. Для насыпного незагрязнённого грунта стандартными методами почвенных исследований проведено определение морфологического, гранулометрического состава и физико-механических свойств. Использованный в эксперименте грунт по составу и

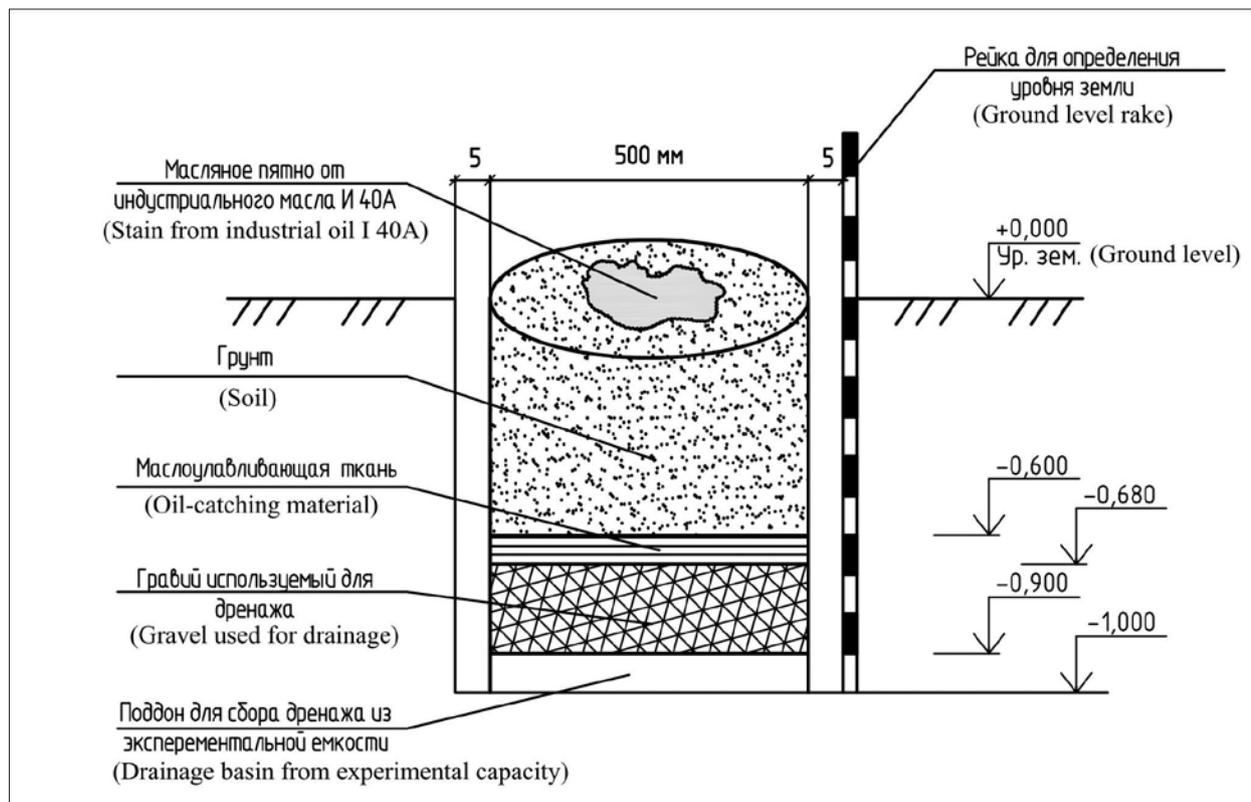


Рис. 1. Схема установки для моделирования условий вертикальной миграции загрязнителя  
 Fig. 1. The scheme of the installation for modeling the conditions of migration of the pollutant

характеристикам приближен к грунтам части промышленной зоны города; почвообразующие породы – пески и супеси древнеаллювиального и водноледникового происхождения, песчаные отложения представлены песком мелкозернистым, глиной и суглинком от мягкопластичной до текучей консистенции. Коэффициент фильтрации незагрязнённого насыпного грунта – 0,5, исходная влажность – 0,148 доли единиц, по результатам исследования водной вытяжки определено значение рН = 7,22±0,10 ед. рН (ГОСТ 26423) и содержание органического вещества – менее 1,0% (ГОСТ 26213).

Технозёмы относят к гетерогенным аккумулярующим системам, в которых движение потока загрязнителя между фазами загрязнённых и условно чистых слоёв является сложным. При описании процесса необходимо учитывать физико-химические свойства загрязнителя, возможность его трансформации при взаимодействии с твёрдой фазой, индивидуальные особенности связывания (удерживания) под влиянием внешних условий.

**Идентификация химического состава индустриального масла (И-40А)** выполнена методом ГХ-МС. Масс-спектрометрическое детектирование выполнено в режиме полного сканирования, при этом регистрировались масс-спектры, по которым проведена идентификация компонентов в пробе воздуха. Для регистрации масс-спектров химических соединений выполняли идентификацию в режиме SCAN. Производилось непрерывное сканирование масс от 38 до 500 а. е. м. со скоростью 3,14 скан в секунду.

**Определение маркерных углеводородов из состава индустриального масла.** Сканирование углеводородов исследуемой пробы воздуха по всему диапазону масс позволило идентифицировать 14 масс-спектров органических соединений со значением коэффициента совпадения с библиотечными данными 4–96% (табл. 2) и 8 масс-спектров органических соединений со значением коэффициента совпадения с библиотечными данными 80–96%. Результаты идентификации углеводородов в пробе воздуха по показателю качества совпадения с библиотечными данными представлены в таблице 2.

Фрагмент хроматограммы представлен на рисунке 2. Достоверность идентификации определяемых соединений была подтверждена сравнением масс-спектров с масс-спектрами, заложенными в банк библиотеки масс-спектральных данных NIST 08.L. Каждый интенсивный пик спектрограммы сопоставлен с соответствующими массами ионов исследуемой спектрограммы. Сравнение масс-спектра толуола с его библиотечным спектром представлено на рисунке 3. Вероятность совпадения масс-спектра толуола с библиотечными данными составила 90%.

Газохроматографический анализ и расшифровка состава показали, что основными компонентами в составе индустриального масла являются ЛОСы (толуол, бензол, этилбензол, о-, п-, м-ксилолы) с преобладанием толуола – 3,46 мг/м<sup>3</sup>. Другие компоненты определены в значительно меньшем количестве: бензол – 0,043 мг/м<sup>3</sup>, этилбензол – 0,0018 мг/м<sup>3</sup>, п-, м-ксилол – 0,037 мг/м<sup>3</sup>, о-ксилол – 0,0043 мг/м<sup>3</sup>.

Таблица 2 / Table 2  
Результаты идентификации пробы воздуха / Results of air sample identification

Ингредиент / Ingredient		Класс опасности Hazard Class	Вероятность совпадения Probability of coincidence, %
Наименование по банку библиотеки масс-спектральных данных Name according to the bank of the library of mass-spectral data	Наименование загрязняющего вещества Name of pollutant		
Toluene	Толуол / Toluene	3	90
Cholesta-3,5-diene	Холеста-3,5-диен Cholesta-3,5-diene	Молекулярное загрязнение Molecular contamination	96
Cholesteryl benzoate	Холестерил бензоат Cholesteryl benzoate		93
Benzenesulfonamide, N-butyl	Бензолсульфонамид, н-бутил Benzenesulfonamide, N-butyl		87
Phenol, 2-methyl-4-(1,1,3,3-tetramethylbutyl)	Фенол, ди-метил-4(1,1,3,3)-тетрамтилбутил Phenol, 2-methyl-4-(1,1,3,3-tetramethylbutyl)	3	60

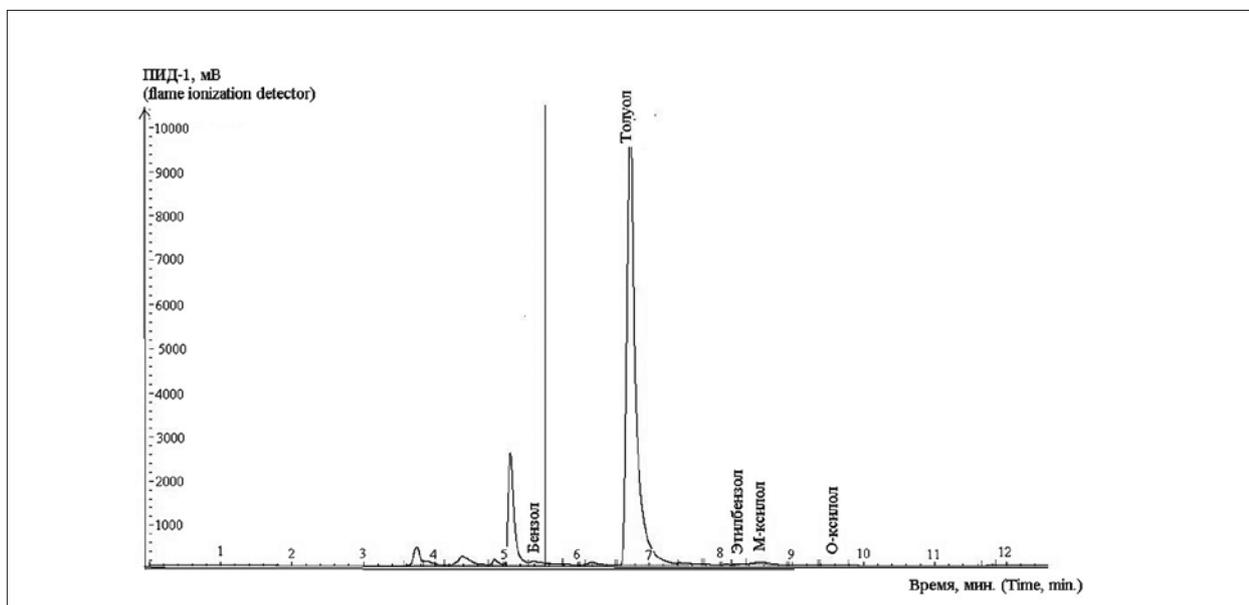


Рис. 2. Идентификация маркерных соединений из состава индустриального масла  
 Fig. 2. Identification of marker compounds from industrial oil

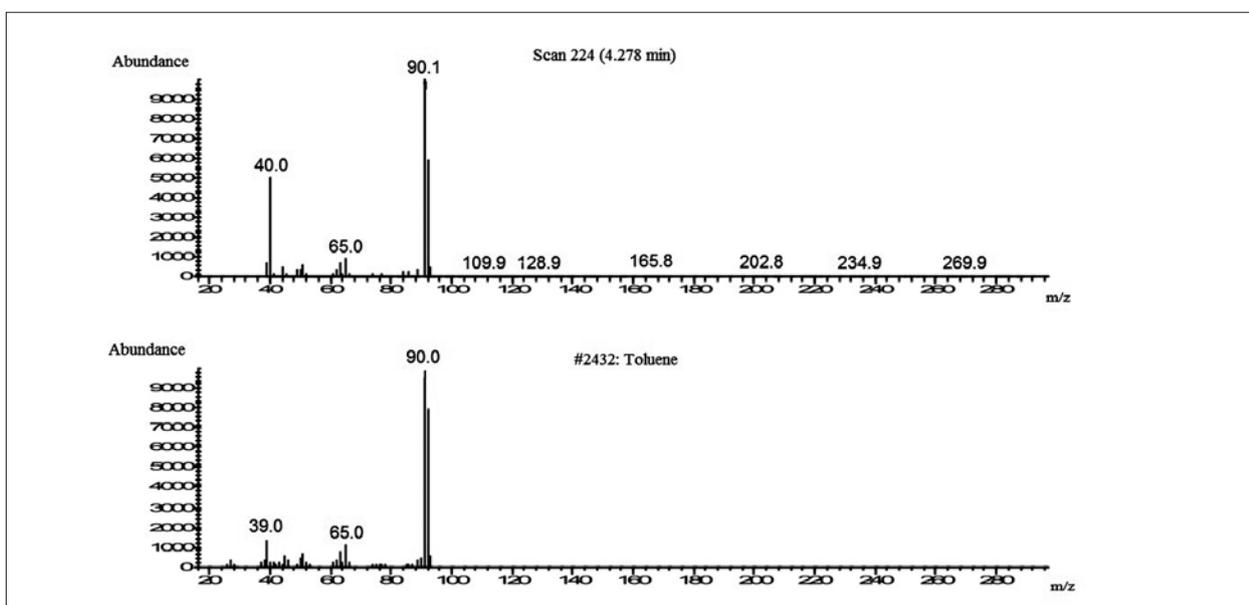


Рис. 3. Масс-спектр толуола из библиотеки NIST  
 Fig. 3. The toluene mass spectrum from the library NIST

Для дальнейших исследований загрязнённого грунта из экспериментальной установки в качестве продуктов трансформации индустриального масла принято содержание ЛОС, содержание толуола использовано в качестве маркерного показателя.

**Результаты определения ЛОС в экспериментальной установке.** На последующих этапах исследований были предусмотрены опробование грунта по всей глубине ёмкости и сравнительная оценка содержания в пробах грунта моноароматических углеводородов.

Установленное содержание летучих соединений в пробах грунта было ниже допустимых нормативных значений для почв, остаточное содержание составляло 0,33 ПДК по ксилолам, 0,14 ПДК – по толуолу; для бензола – на уровне предела обнаружения методики. Это связано с характерным для рассматриваемых соединений показателем вредности – воздушно-миграционным и транслокационным. Содержание бензола в пробах почвы практически не менялось по этапам исследований, содержание толуола и ксилолов менялось

по профилю ёмкости. Максимальные концентрации всегда фиксировались в верхнем горизонте загрязнённого грунта (0–15 см) и были в два и более раза больше концентраций, установленных в пробах с середины (15–35 см) и глубины шурфа. Остаточное содержание продуктов трансформации СОЖ в пробах грунта по профилю модельной ёмкости представлено в таблице 3.

Наибольшее загрязнение грунта из ёмкости было зафиксировано при демонтаже установки в виде локального объёма грунта в пристеночном пространстве на глубине. Содержание толуола в этой пробе грунта составило  $2,84 \pm 0,56$  мг/кг, в образце маслоудерживающей ткани –  $4,80 \pm 0,96$  мг/кг. Таким образом, высокая проницаемость использованного в модельной установке насыпного грунта и атмосферные осадки способствовали продвижению загрязнителя по профилю ёмкости и его аккумуляции в нижнем слое грунта. Вероятно, что грунты с меньшей диффузионной проницаемостью ограничивали бы глубину миграции органических соединений.

Хорошая удерживающая способность гидроизоляционного материала, использованного в модельной установке, позволила предотвратить загрязнение природной почвы и верховодки. После демонтажа экспериментальной установки отобрана проба фильтрата из поддона, в котором собиралась дренажная вода. При исследовании фильтрата установлены следующие концентрации моноароматических соединений: бензол –  $0,002$  мг/дм<sup>3</sup>, толуол –  $0,001$  мг/дм<sup>3</sup>, ксилолы –  $0,004$  мг/дм<sup>3</sup>.

Исследование проб почвенного воздуха в шурфе выполнялось по методике газогеохимических исследований. На каждом из трёх этапов исследования, после проведения отбора проб грунта, полость (шурф глубиной 60 см) накрывалась ёмкостью, и затем выполнялся отбор проб почвенного воздуха с последующим количественным определением углеводородов. Результаты исследований представлены в таблице 4. Содержание загрязняющих веществ не превышало допустимых значений.

Таблица 3 / Table 3

Содержание летучих соединений в пробах грунта  
The content of volatile compounds in soil samples

Этап исследования Research stage	Глубина отбора пробы, см Depth of sampling, cm	Содержание, мг/кг / Content, mg/kg		
		бензол benzene	толуол toluene	о,м,п-ксилол o-,m-,p-xylene
1	0–18	$0,0030 \pm 0,0006$	$0,0420 \pm 0,0084$	$0,099 \pm 0,0198$
	18–38	$0,0030 \pm 0,0006$	$0,0220 \pm 0,0044$	$0,050 \pm 0,01$
	40–60	$0,0010 \pm 0,0002$	$0,0020 \pm 0,0044$	нпо / BDL
2	0–18	$0,0010 \pm 0,0002$	$0,0020 \pm 0,0044$	$0,001 \pm 0,0002$
	18–38	нпо / BDL *	$0,0010 \pm 0,0002$	$0,001 \pm 0,0002$
	40–60	нпо / BDL	$0,0010 \pm 0,0002$	нпо / BDL
3	0–18	$0,0030 \pm 0,0006$	$0,0280 \pm 0,0056$	$0,005 \pm 0,01$
	18–38	$0,0020 \pm 0,0004$	$0,0030 \pm 0,0006$	нпо / BDL
	40–60	$0,0020 \pm 0,0004$	$0,0030 \pm 0,0006$	нпо / BDL
Величина ПДК, мг/кг (ГН 2.1.7.2041-06) MPC, mg/kg (Hygiene Regulations 2.1.7.2041-06)		0,3	0,3	0,3

Примечание \* нпо – ниже предела обнаружения  
Note: BDL – below detection limit.

Таблица 4 / Table 4

Содержание летучих соединений в пробах почвенного воздуха  
The content of volatile compounds in soil air samples

Наименование загрязняющего вещества Name of pollutant	ПДК мг/м <sup>3</sup> MPC mg/m <sup>3</sup>	Содержание в почвенном воздухе по этапам исследования, мг/ м <sup>3</sup> / Content in soil air in terms of research stage, mg/m <sup>3</sup>		
		1 этап / stage 1	2 этап / stage 2	3 этап / stage 3
Бензол / Benzene	0,3	0,021	0,0075	0,0048
Толуол / Toluene	0,6	0,003	0,0078	0,0042
О-ксилол / O-Xylene	0,2	0,005	0,0185	0,0052

## Заключение

Анализ информации о составе и свойствах компонентов СОЖ позволили предположить, что продуктами трансформации сложного компонентного состава индустриального масла могут быть моноароматические углеводороды и летучие ароматические соединения.

Хромато-масс-спектрометрический анализ актуален в условиях недостаточно полных данных о фактическом состоянии объекта исследования, имеет возможность с большой степенью вероятности выявить качественный и с высокой точностью – количественный состав. Установлены продукты трансформации индустриального масла (И-40А): толуол – 3,46 мг/м<sup>3</sup>, бензол – 0,043 мг/м<sup>3</sup>, этилбензол – 0,0018 мг/м<sup>3</sup>, ксилолы – 0,0043 мг/м<sup>3</sup>. Для дальнейших исследований в качестве контролируемых показателей принято содержание ЛОС, содержание толуола использовано в качестве маркера.

При опробовании грунта на содержание ЛОС установлено их остаточное содержание ниже допустимых нормативных значений для почв – 0,33 ПДК по ксилолам, 0,14 ПДК по толуолу, для бензола – на уровне предела обнаружения методики, что связано с характерным для рассматриваемых соединений воздушно-миграционным показателем вредности. Высокая проницаемость насыпного грунта и атмосферные осадки способствовали продвижению загрязнителя с поверхности по всей глубине ёмкости и его аккумуляции в нижнем слое грунта. Маслоудерживающая ткань явилась эффективным барьером для миграции загрязнения в грунтовые воды.

Обобщение и анализ полученных результатов позволят обосновать методику оценки загрязнения промышленных площадок СОЖ с учётом трансформации загрязнителя, применить полученные результаты в рекомендациях по рекультивации загрязнённых технозёмов.

## Литература

1. Кашперюк А.А., Кашперюк П.И. Специфика инженерно-геологических изысканий на ранее освоенных и повторно используемых для строительства городских территориях // Инженерные изыскания, 2014. № 13–14. С. 53–57.
2. Галицкая И.В., Позднякова И.А. К проблеме загрязнения подземных вод и пород зоны аэрации нефтепродуктами и ПАУ на городских территориях // Геоэкология, инженерная геология, гидроэкология, геокриология. 2011. № 4. С. 337–343.

3. Гончаренко У.Н., Савостенко В.А. Современные тенденции реновации промышленных территорий // Архитектура и дизайн: история, теория, инновации. 2017. № 2. С. 74–80.
4. Фомина Е.Ю. Санирование промышленных зон. Учеб. пособие. Иркутск: ИрГТУ, 2009. 118 с.
5. Huang W.H., Kao C.M. Bioremediation of petroleum-hydrocarbon contaminated groundwater under sulfate-reducing conditions: effectiveness and mechanism study // Journal of Environmental Engineering, ASCE. 2016. V. 142. No. 3. P. 04015089.
6. Florencio L., Kato M.T., de Lima E.S. Integrated measures for preservation, restoration and improvement of the environmental conditions of the lagoon olho d'agua basin // Environment International. 2001. V. 26. No. 7–8. P. 551–555.
7. Пункевич Б.С., Садовникова С.В., Землякова М.А., Лось К.С. Химико-аналитический контроль содержания отравляющих веществ в почвах. Методологический аспект // Теоретическая и прикладная экология. 2014. № 4. С. 108–112.
8. Евдокимов А.Ю., Фукс И.Г., Любинин И.А. Смазочные материалы в техносфере и биосфере: экологический аспект. Киев: Атика-Н, 2012. 292 с.
9. Васильев А.В., Хамидуллова Л.Р. Анализ негативного воздействия смазочно-охлаждающих жидкостей на человека и биосферу и методов его снижения // Вектор науки Тольяттинского государственного университета. 2011. № 4. С. 45–49.
10. Almeda R., Wambaugh Z., Chai C., Liu Z., Buskey E.J. Effects of crude oil exposure on bioaccumulation of polycyclic aromatic hydrocarbons and survival of adult and larval stages of gelatinous zooplankton // Public Library of Science (PLoS One). 2013. V. 8. No. 10. P. e74476. doi: 10.1371/journal.pone.0074476.
11. Майборода С.Э. Обращение с отработанными маслами в России // Экология производства. 2015. № 4. С. 26–34.
12. Федосеева Е.Н., Зорин А.Д., Занозина В.Ф., Самсонова Л.Е. Миграция нефтепродуктов из загрязненной почвы в насыпной изолирующий слой чистого песка // Химия в интересах устойчивого развития. 2014. № 22. С. 497–503.
13. Карика Н.А. Эколого-биохимическая оценка состояния загрязненных отработанными автомобильными моторными маслами почв // Экологические системы и приборы. 2015. № 3. С. 12–18.
14. Zhang Z., Brusseau M.L. Nonideal transport of reactive contaminants in heterogeneous porous media: 7. Distributed-domain model incorporating immiscible-liquid dissolution and rate-limited sorption/desorption // Journal of Contaminant Hydrology. 2004. No. 74 (1–4). P. 83–103. doi: 10.1016/j.jconhyd.2004.02.006.
15. Nichols E., Beadle S., Einarson M. Strategies for characterizing subsurface releases of gasoline containing MTBE, Regulatory and Scientific Affairs, API. 2000. No. 4699. P. 24–31.

16. Vošahlikova M., Pazlarova J., Demnerova K. Prehled remediacnich technologii methylterc buyletheru (MTBE), Chem. Listy 98. 2004. P. 903–907.

17. Абросимов А.А. Экология переработки углеводородных систем / Под ред. М.Ю. Доломатова, Э.Г. Теляшева. М.: Химия, 2002. 608 с.

18. Wiley Registry of Mass Spectral Data, 9th Edition, 8th Edition, and Other Specialty Wiley Mass Spectral Libraries [Электронный ресурс] <http://www.sisweb.com/software/ms/wiley.htm> (Дата обращения 10.11.2011.).

19. Best practices in mass spectral library usage for accurate structural identification and spectra interpretation of unknown compounds // ChemSW publication. 2011. 25 p. [Электронный ресурс] <http://www.ChemSW.com> (Дата обращения 08.11.2011)

20. NIST Standard reference Database 1A. NIST/EPA/NIH Mass Spectral database (NIST 11) and NIST Mass Spectral Search Program (Version 2.0g) [Электронный ресурс] <http://www.nist.gov/srdr/nistla.cfm> (Дата обращения 10.11.2011.).

21. РД 52.04.186-89 Руководство по контролю загрязнения атмосферы. М.: Госкомгидромет СССР, 1991. 693 с.

## References

1. Kashperuk A.A., Kashperuk P.I. Specificity of engineering-geological surveys in urban areas previously developed and reuse for construction // *Inzhenernye izyskaniya*. 2014. No. 3 (14). P. 53–57 (in Russian).

2. Galitskaya I.V., Pozdnyakova I.A. Contamination of groundwater and unsaturated zone deposits with oil products and PAN in urban areas // *Geoekologia. Inzhenernaya geologiya, gidrogeologiya, geokriologiya (environmental Geoscience)*. 2011. No. 4. P. 337–343 (in Russian).

3. Goncharenko U.N., Savostenko V.A. Modern trends in the renovation of industrial areas // *Arkhitektura i dizayn: istoriya, teoriya, innovatsii*. 2017. No. 2. P. 74–80. (in Russian).

4. Fomina E.Yu. Sanitization of industrial zones. Irkutsk: Irkutsk State Technical University. 2009. 118 p. (in Russian).

5. Huang W.H., Kao C.M. Bioremediation of petroleum-hydrocarbon contaminated groundwater under sulfate-reducing conditions: effectiveness and mechanism study // *Journal of Environmental Engineering, ASCE*. 2016. V. 142. No. 3. P. 04015089.

6. Florencio L., Kato M.T., de Lima E.S. Integrated measures for preservation, restoration and improvement of the environmental conditions of the lagoon olho d'agua basin // *Environment International*. 2001. V. 26. No. 7–8. P. 551–555.

7. Punkevich B.S., Sadovnikova S.V., Zemlyakova M.A., Los' K.S. Chemical and analytical control of toxic substances in soils. Methodological aspect // *Theoretical*

*and Applied Ecology*. 2011. No. 4. P. 108–112. (in Russian).

8. Yevdokimov A.Yu., Fuks I.G., Lyubinin I.A. Lubricating material in the technosphere and biosphere: the ecological aspect. Kiev: Atika-N. 2012. 292 p. (in Russian).

9. Vasilyev A.V., Khamidulova L.R. Analysis of negative influence of lubricating-cooling liquids to the man and to biosphere and of methods of it reduction // *Vektor nauki Tolyattinskogo gosudarstvennogo universiteta*. 2011. No. 4. P. 45–49. (in Russian).

10. Almeda R., Wambaugh Z., Chai C., Liu Z., Buskey E.J. Effects of crude oil exposure on bioaccumulation of polycyclic aromatic hydrocarbons and survival of adult and larval stages of gelatinous zooplankton // *Public Library of Science (PLoS One)*. 2013. V. 8. No. 10. P. e74476. doi: 10.1371/journal.pone.0074476.

11. Mayboroda S.E. Treatment of waste oils in Russia // *Ekologiya i proizvodstva*. 2015. No. 4. P. 26–34 (in Russian).

12. Fedoseyeva Ye.N., Zorin A.D., Zanozina V.F., Samsonova L.Ye. Migration of oil products from contaminated soil to bulk insulating layer of pure sand // *Khimiya v interesakh ustoychivogo razvitiya*. 2014. No. 22. P. 497–503 (in Russian).

13. Karika N. Ah. Ecological and biochemical assessment of soils contaminated with used motor oils // *Ekologicheskie sistemy i pribory*. 2015. No. 3. P. 12–18 (in Russian).

14. Zhang Z., Brusseau M.L. Nonideal transport of reactive contaminants in heterogeneous porous media: 7. Distributed-domain model incorporating immiscible-liquid dissolution and rate-limited sorption/desorption // *Journal of Contaminant Hydrology*. 2004. No. 74 (1-4). P. 83–103. doi: 10.1016/j.jconhyd.2004.02.006.

15. Nichols E., Beadle S., Einarson M. Strategies for characterizing subsurface releases of gasoline containing MTBE, Regulatory and Scientific Affairs, API. 2000. No. 4699. P. 24–31

16. Vošahlikova M., Pazlarova J., Demnerova K. Prehled remediacnich technologii methylterc buyletheru (MTBE), Chem. Listy 98. 2004. P. 903–907.

17. Abrosimov A. Ecology of hydrocarbon processing systems / Ed. M.Y. Dolmatov, E.G. Telesheva. Moskva: Chemistry. 2002. 608 p. (in Russian).

18. Wiley Registry of Mass Spectral Data, 9th Edition, 8th Edition, and Other Specialty Wiley Mass Spectral Libraries [Internet resource] <http://www.sisweb.com/software/ms/wiley.htm> (Accessed 10.11.2011.).

19. Best practices in mass spectral library usage for accurate structural identification and spectra interpretation of unknown compounds // ChemSW publication. 2011. 25 p. [Internet resource] <http://www.ChemSW.com> (Accessed: 08.11.2011)

20. NIST Standard reference Database 1A. NIST/EPA/NIH Mass Spectral database (NIST 11) and NIST Mass Spectral Search Program (Version 2.0g) [Internet resource] <http://www.nist.gov/srdr/nistla.cfm> (Accessed: 10.11.2011.).

21. Manual on the control of atmospheric pollution. Moskva: Goskomgidromet SSSR. 1991. 693 p. (in Russian).

## Получение экологически безопасных строительных материалов с использованием осадков сточных вод целлюлозно-бумажного производства

© 2018. Е. С. Ширинкина, к. т. н., доцент,  
Пермский национальный исследовательский политехнический университет,  
614990, Россия, Пермь, Комсомольский проспект, 29,  
e-mail: shirinkina.es@mail.ru

В работе представлены исследования в области использования осадка сточных вод целлюлозно-бумажной промышленности (ЦБП) в качестве ресурса при производстве строительных материалов. В ходе анализа научно-технической информации было установлено, что осадок сточных вод ЦБП, содержащий в своём составе целлюлозное волокно (скоп) и активный ил, может применяться в качестве добавки при производстве композитных материалов, теплоизоляционных плит, лёгких заполнителей для бетонов и в качестве выгорающей добавки при производстве керамического кирпича. В лабораторных условиях исследовали возможность получения керамического кирпича с добавлением осадка сточных вод ЦБП в количестве 4 и 8% масс. Было установлено, что при введении осадка в керамическую массу снижается плотность образцов, уменьшается линейная воздушная и огневая усадка. Прочность образцов на сжатие при дозировании осадка существенно увеличивается по сравнению с контролем, что обусловлено выделением дополнительной тепловой энергии при сгорании осадка в шихте в процессе обжига. Установлено также, что прочность образцов на изгиб снижается по сравнению с контролем, однако с повышением температуры обжига до 1070 °С было достигнуто повышение прочности на изгиб. Сравнительный анализ полученных данных по прочности образцов керамического кирпича с требованиями ГОСТ показал, что при введении осадка в шихту в количестве 4–8% масс. в качестве выгорающей добавки возможно получение полнотелого керамического кирпича, соответствующего по прочности марке М150-М200.

**Ключевые слова:** осадок сточных вод ЦБП, активный ил, скоп, целлюлозное волокно, выгорающая добавка.

## Production of environmentally friendly building materials with use of pulp and paper sludge

© 2018. E. S. Shirinkina <sup>ORCID 0000-0002-0244-4110</sup>  
Perm National Research Polytechnic University,  
29, Komsomolskiy Prospect, Perm, Russia, 614990,  
e-mail: shirinkina.es@mail.ru

The paper presents the research in the field of using pulp and paper sludge as a resource in the production of environmentally-friendly building materials. During the analysis of scientific and technical information, it was found out that pulp and paper sludge, containing cellulose fiber and secondary sludge, can be used as an additive in the production of composite materials, insulation boards, light aggregates for concretes and combustible additives for production of ceramic bricks. In the laboratory, the possibility of obtaining a ceramic brick with addition of pulp and paper sludge in an amount of 4 and 8% by weight was researched. It was found that when pulp and paper sludge is introduced into the ceramic mass, the density of the bricks samples decreases, linear air shrinkage decreases to 2.7% (for samples with pulp and paper sludge addition in quantity of 4% mass), and 9.1% (for samples with pulp and paper sludge addition in quantity of 8% mass) in comparison with control samples without pulp and paper sludge addition, fire shrinkage decreases from 5.1% to 3.65% and 2.06% for samples with pulp and paper sludge content 4% and 8% mass respectively. Compressive strength of researched samples with pulp and paper sludge content significantly increases (up to 90.2%) in comparison with the control samples, which is due to the release of additional thermal energy during the combustion of the pulp and paper sludge in the ceramic mass while the brick firing process. It has also been established that the bending strength of researched samples is reduced in comparison with the control samples, but with an increase of firing temperature to 1070 °C, an increase in bending strength has also been achieved. A comparative analysis of the obtained data on the strength of ceramic brick samples with the requirements of National State Standard showed that when the pulp and paper sludge is introduced into the ceramic mass in an amount of 4–8% by weight, as a combustible additive, it is possible to obtain solid ceramic brick suitable for building.

**Keywords:** pulp and paper sludge, secondary sludge, primary sludge, cellulose fiber, combustible additive.

На сегодняшний день предприятия целлюлозно-бумажной отрасли России успешно реализуют технологии производства продукции с использованием как первичного, так и вторичного сырья. Наиболее широко используется древесина хвойных и лиственных пород, что связано с отсутствием системы раздельного сбора отходов в России и наличием больших запасов лесных ресурсов. Однако при производстве упаковочных видов картонно-бумажной продукции применяется в основном макулатурное сырьё по причине его более низкой стоимости по сравнению с первичным сырьём [1, 2].

Процессы подготовки и переработки первичного и вторичного сырья на целлюлозно-бумажных предприятиях являются ресурсо- и энергоёмкими, при этом приводят к образованию большого количества отходов окорки и распиловки древесины, отходов очистки макулатуры в виде остатков плёнок и скотча, осадков сточных вод.

В настоящее время проблема утилизации твёрдых отходов на целлюлозно-бумажных предприятиях успешно решается путём применения термических технологий, обеспечивающих использование энергетического потенциала отходов и предотвращающих их размещение в окружающей среде [3–5]. Однако процесс совместного термического обезвреживания всех отходов связан с возникновением ряда технологических проблем, основными из которых являются увеличение длительности термического процесса и снижение количества выделяемой тепловой энергии по причине высокой влажности и зольности топливной смеси.

Исследования термического процесса на примере одного из предприятий отрасли показали, что на эффективность процесса в первую очередь негативно влияет избыточное количество осадка сточных вод, подаваемого в топливную смесь, в связи с высокой влажностью и зольностью осадка [6]. Поэтому актуальным является поиск альтернативных способов обращения с избыточным количеством осадка сточных вод целлюлозно-бумажных предприятий.

В технологии очистки производственных сточных вод целлюлозно-бумажных предприятий основными видами осадков являются осадок первичных отстойников, представляющий собой короткое целлюлозное волокно (скоп) и избыточный активный ил. Дальнейшая утилизация осадков осуществляется, как правило, совместно. При этом смесь скопа и

активного ила подвергается предварительному сгущению и механическому обезвоживанию [7].

Анализ научно-технической информации в области обращения с осадком сточных вод целлюлозно-бумажных предприятий показал целесообразность его использования в качестве вторичного сырьевого ресурса в производстве строительных материалов [8]. Авторами данной работы выполнены исследования в области использования скопа в качестве сырьевого компонента при производстве плит несъёмной опалубки. Предлагаемый авторами состав содержит скоп в количестве 25–45%, тонкомолотый минеральный компонент, в качестве которого может быть использован порландцемент, вяжущее на основе тонкомолотого доменного шлака и жидкого стекла, глинозёмистый цемент или микрокремнезём – 15–40, базальтовое волокно – 10–20, антисептик – 0,5–1,0, вода – 20–24,5%. В результате использования предлагаемого состава могут быть получены плиты, остающиеся в качестве внутреннего и наружного слоя ограждающей конструкции при строительстве зданий монолитным способом.

Скоп, применяемый в качестве добавки к составу, содержит порядка 75–90% целлюлозных волокон длиной 150–250 мкм, толщиной 1–5 мкм хаотично переплетённых между собой.

Введение скопа в качестве волокнистой добавки в предлагаемый состав позволяет добиться увеличения прочности конструкции, снижения трещинообразования и уменьшения себестоимости строительного материала. Преимуществом предлагаемого состава плит несъёмной опалубки является также существенное снижение массы плиты, уменьшение расхода цемента, повышение ударной вязкости и сопротивления теплопередаче. За счёт наличия у скопа сорбционных свойств наряду с повышением механических показателей конструкции обеспечивается поглощение вредных компонентов, поступающих в атмосферный воздух при использовании в строительных конструкциях пенополистирола.

Результаты исследования химических свойств осадков сточных вод шести разных целлюлозно-бумажных предприятий, производящих офисную бумагу и полуфабрикаты представлены в работе [9]. Образующиеся в технологическом процессе каждого предприятия осадки существенно отличались по физико-химическим свойствам. Так содержание целлюлозного волокна в исследуемых

осадках варьировалось от 11,9–81,6%. На основании анализа состава исследуемых осадков сточных вод авторами рекомендованы технологии использования ресурсного потенциала их минеральной и органической составляющей.

Осадки, с содержанием целлюлозного волокна порядка 30,7–81,6% и прочих минеральных наполнителей рекомендовано использовать в качестве сырьевых компонентов для производства древесноволокнистых плит, а осадки с высоким содержанием минеральных наполнителей могут быть использованы в качестве заполнителей в цементных растворах. При этом количество вводимого в цемент осадка может достигать 10% масс. Осадок может успешно вводиться в качестве добавки к штукатурным смесям и гидрофобным строительным покрытиям.

Авторами [10] исследовалось производство древесно-стружечных плит с использованием осадка сточных вод ЦБП. Зольность используемого осадка составляла 27,76%, на долю целлюлозного волокна приходилось – 20,83, содержание лигнина составляло 17,41, растворимых компонентов – 6,37%. Осадок смешивали с древесными волокнами в соотношениях 0:100, 15:85, 30:70, 45:55 с добавлением связующих в качестве которых использовались формальдегид и метилendiфенилдиизоцианат. Из полученной смеси формовали фибер-маты путём горячего прессования, дальнейшие исследования которых на прочность показали соответствие их прочностных характеристик стандартам Европейского Союза.

Технология изготовления древесно-пластиковых композитов с добавлением осадков сточных вод ЦБП с последующим использованием полученных композитов для изготовления черепицы, ограждающих конструкций, настилов представлена в работах [11, 12]. Осадок использовался в качестве армирующего компонента вместо части древесного волокна (до 50% масс.) в полипропилене. Исследования механических свойств полученного композита показали, что минеральные наполнители в композитных материалах на основе полипропилена могут быть успешно заменены осадками сточных вод ЦБП, если полученные композиты предполагается использовать в качестве материала для производства изделий, испытывающих небольшие механические нагрузки: панели, мебель, ограждающие конструкции.

Изучена возможность введения осадка сточных вод целлюлозно-бумажного произ-

водства в качестве аналога древесного волокна в смеси для изготовления поддонов, предназначенных для перевозки грузов, в состав которых входит древесина, пластик и металл [13]. Осадок смешивали с древесными волокнами с добавлением формальдегида в качестве связующего и подвергали затвердеванию в присутствии хлорида аммония. Используемый осадок содержал порядка 20,83% масс. целлюлозных волокон, зольность осадка составляла 27,76%. Поддоны, полученные из смеси с дозированием осадка в количестве 10% масс. отвечали требованиям европейских стандартов для продукции данного типа.

В работе [14] исследовано получение древесных пластиков с использованием скопа и активного ила. В качестве матрицы использовался полиэтилен высокого давления. Предварительно обезвоженные, нагретые и измельчённые скоп и активный ил смешивали в соотношении 7:3 и 9:1. Высушенную смесь объединяли с полиэтиленом высокого давления (массовое содержание смеси в полиэтилене составляло 20, 30, 40%) в двухшнековом экструдере при температуре 1558 °С с получением гранул. Получение композита с использованием осадков сточных вод ЦБП позволило увеличить его температуру плавления.

Авторами [15] исследовалась возможность использования осадка в качестве заполнителя в резиновых композитах. Микрористаллическая целлюлоза, полученная из осадка, использовалась в качестве частичной замены кремниевых частиц (заменяли до 18% диоксида кремния в резиновом композите), что обеспечило повышение прочности материала на растяжение.

Проведены исследования по получению лёгкого заполнителя для бетона на основе осадка сточных вод ЦБП, в которых использовался осадок как первичных, так и вторичных отстойников, при этом образцы лёгкого заполнителя получены путём гранулирования осадка, его сушки и последующего спекания [16]. Полученные образцы соответствовали требованиям по прочности и водопоглощению, предъявляемым к лёгким заполнителям.

Автором исследования [17] предложено изготовление теплоизоляционных материалов на основе скопа, в которых скоп может играть роль связующего или волокнистого армирующего компонента; сорбционноактивного заполнителя в цементных композициях для производства штукатурок; заполнителя при производстве несъёмной опалубки. Использование скопа при производстве теплоизо-

ляционных плит позволило снизить их себестоимость на 10–20%.

Известны исследования в области использования осадков сточных вод ЦБП при производстве кирпича. Авторами [18] предложена керамическая масса для изготовления стеновых строительных изделий, преимущественно кирпича, содержащая суглинок (64–66% масс.), выгорающую добавку на основе скопа – осадка сточных вод от химической обработки отходов производства картона – (6–9% масс.), железосодержащий отход в виде осадка из циклонов от очистки поверхности стальных конструкций или деталей дробеструйным аппаратом (7–13% масс.), керамзитовую вспучивающуюся глину. Изделия, полученные на основе предложенной смеси обладают повышенной прочностью и характеризуются низкой степенью усадки.

На основании анализа современных исследований в области использования осадка сточных вод целлюлозно-бумажной промышленности при получении экологически безопасных строительных материалов с учётом экономической целесообразности применения существующих технологий было принято решение о проведении исследований по получению полнотелого керамического кирпича с использованием осадка в качестве выгорающей добавки.

Целью исследования являлось установление возможности получения полнотелого керамического кирпича, отвечающего требованиям ГОСТ, с добавлением осадка сточных вод ЦБП в качестве выгорающей добавки.

**Объекты и методы исследования**

В исследованиях использовался осадок сточных вод, образующийся на очистных сооружениях предприятия (в первичных отстойниках), являющегося типичным представителем целлюлозно-бумажной отрасли и использующим в технологии производства как первичное, так и вторичное сырьё. Осадок (скоп) представлял собой серую пастообразную массу, в состав которой входит мелкое целлюлозное волокно (около 90% масс.), осадок не растворяется в воде, имеет склон-

ность к налипанию, смерзанию и слёживанию. Насыпная плотность осадка составляла 1,048 т/м<sup>3</sup>, влажность 83%. Осадок относится к 5 классу опасности, не оказывает токсического действия на организм человека и содержит в своём составе преимущественно волокно лиственной полуцеллюлозы и макулатуры.

Лабораторные исследования включали следующие этапы:

Получение лабораторных образцов полнотелого керамического кирпича с добавлением осадка в качестве выгорающей добавки (мас-совое содержание скопа 4 и 8%), обожжённого при температурах 970 и 1070 °С.

Исследование плотности, водопоглощения, пределов прочности полученных образцов при сжатии и изгибе.

Установление математических зависимостей изменения основных характеристик полученных образцов при варьировании температурой обжига и количеством вводимого осадка.

В качестве исходного сырья при проведении экспериментов применяли глину, основные характеристики которой представлены в таблице 1.

Испытания глинистого сырья проводили в соответствии с требованиями ГОСТ 21216-2014 Сырьё глинистое. Методы испытаний. Среди основных показателей у глинистого сырья определяли в процентах нижнюю границу текучести (23,9%), границу раскатывания (17,2%) и число пластичности (6,7%).

Механические свойства лабораторных образцов определяли по стандартным методикам, исследования по определению воздушной и огневой усадки проводили по стандартной методике по ГОСТ 21216-2014 Сырьё глинистое. Методы испытаний. Водопоглощение образцов определяли в соответствии с методикой ГОСТ 2409-95 (ИСО 5017-88) Огнеупоры. Метод определения кажущейся плотности, открытой и общей пористости, водопоглощения. Прочностные характеристики образцов исследовались по методикам ГОСТ 8462-85 Материалы стеновые. Методы определения пределов прочности при сжатии и изгибе.

Статистический анализ экспериментальных данных и получение математических за-

**Таблица 1 / Table 1**

Состав используемой глины / Composition of used clay								
Содержание основных химических элементов, % (по массе) Content of basic chemical elements, % (by weight)								
Si	Al	Fe	Mg	Ti	K	Na	Ca	O
27,80	10,40	5,27	1,30	0,90	1,71	0,77	1,00	50,95

висимостей функций отклика выполнялись в программном комплексе STATISTICA.

**Результаты исследований и их обсуждение**

Осадок, использующийся в качестве выгорающей добавки, предварительно подготавливался следующим образом: навеска 1000 г высушивалась до постоянной массы при температуре 70±1 °С (в течение 7 суток), затем измельчалась в шаровой мельнице с фарфоровыми мелющими телами с течение 48 часов, далее – просеивалась через сито с размером ячейки 0,315 мм. Полученную фракцию вводили в глинистое сырьё взамен его части.

Образцы из глинистого сырья с добавлением осадка в качестве выгорающей добавки (массовое содержание осадка 4 и 8%) и контрольные образцы из чистой глины обжигались при температурах 970 и 1070 °С.

Для получения достоверных зависимостей изменения основных характеристик керамических образцов от содержания в них осадка и температуры обжига был спланирован и проведён двухфакторный эксперимент с центральным ортогональным планом, с изменением каждого фактора на двух уровнях. В

качестве факторов использовали: количество вводимого скопа (4 и 8% по массе взамен основного сырья); температура обжига (970 и 1070 °С). В результате эксперимента были определены следующие показатели (функции отклика): предел прочности при сжатии (МПа), предел прочности при изгибе (МПа), воздушная и огневая линейные усадки (%), водопоглощение по массе (%), средняя плотность (г/см<sup>3</sup>). План эксперимента в натуральных величинах и значения функции отклика в каждой точке плана приведены в таблице 2.

Значения получены с доверительной вероятностью 0,95.

На основании установленных данных в программном комплексе STATISTICA были получены математические зависимости функций отклика:

$$z_1 = -0,28 - 0,065 \cdot x + 0,002 \cdot y + 0,00005 \cdot x \cdot y$$

$$z_2 = 8,07 - 0,125 \cdot x$$

$$z_3 = -41,412 + 4,498 \cdot x + 0,0436 \cdot y - 0,004575 \cdot x \cdot y$$

$$z_4 = 86,964 + 5,61 \cdot x - 0,0752 \cdot y - 0,004393 \cdot x \cdot y$$

$$z_5 = -9,51 + 0,1075 \cdot x + 0,033 \cdot y + 0,00025 \cdot x \cdot y$$

$$z_6 = -177,56 + 5,0965 \cdot x + 0,1925 \cdot y - 0,005734 \cdot x \cdot y$$

где  $z_1$  – средняя плотность образца (г/см<sup>3</sup>);  $z_2$  – воздушная линейная усадка (%);  $z_3$  – огневая

**Таблица 2 / Table 2**

План эксперимента и значения функции отклика в каждой точке плана  
The experimental design and the response function values at each point of the plan

Номер образца Sample number	1	2	3	4	Контрольный образец 1 Control sample 1	Контрольный образец 2 Control sample 2
Количество вводимого осадка, % Content of pulp and paper sludge, %	4	4	8	8	0	0
Температура, °С Temperature, °C	970	1070	970	1070	970	1070
Плотность, г/см <sup>3</sup> Density, g/cm <sup>3</sup>	1,60	1,82	1,54	1,78	1,71	1,98
Воздушная линейная усадка, % Air linear shrinkage, %	7,57	7,57	7,07	7,07	7,78	7,78
Огневая линейная усадка, % Fire linear shrinkage, %	1,12	3,65	1,36	2,06	0,60	5,10
Водопоглощение, % Water absorption, %	17,36	7,87	20,70	9,24	12,96	5,86
Предел прочности при сжатии, МПа Compressive strength, MPa	23,9	27,3	25,3	28,8	13,3	26,4
Предел прочности при изгибе, МПа Bending strength, MPa	7,3	24,25	5,42	20,08	9,93	31,34

вая линейная усадка (%);  $z_4$  – водопоглощение по массе (%);  $z_5$  – предел прочности при сжатии (МПа);  $z_6$  – предел прочности при изгибе (МПа);  $x$  – содержание осадка в керамической массе (в интервале 4–8% масс.),  $y$  – температура обжига (в интервале 960–1080 °С).

На основании полученных результатов можно сделать следующие выводы:

- воздушная линейная усадка при введении осадка в количестве 4 и 8% снижается на 2,7 и 9,1% соответственно по сравнению с контрольными образцами;

- средняя плотность обожжённых образцов изменяется обратно пропорционально увеличению расхода осадка. При этом значение средней плотности при повышении температуры с 970 до 1070 °С увеличивается в среднем на 13–15%;

- огневая линейная усадка образцов, обожжённых при температуре 1070 °С, снижается с 5,1% (контрольный образец) до 3,65 и 2,06% у составов с содержанием осадка 4 и 8% соответственно;

- водопоглощение образцов, обожжённых при 970 °С, увеличивается в среднем на величину введения осадка в смесь (на 4,4 и 7,7% соответственно). Однако при увеличении температуры обжига до 1070 °С величина открытой пористости у образцов с содержанием осадка 4 и 8% увеличивается лишь на 2,01 и 3,38% соответственно;

- предел прочности при сжатии образцов с содержанием осадка (обжиг при 970 °С) превышает контрольные значения на 79,7 и 90,2% соответственно. При этом повышение температуры до 1070 °С способствует повышению прочности при сжатии в среднем на 14% (прочность контрольных образцов при тех же условиях увеличилась в 1,98 раза). Такая зависимость обусловлена дополнительной тепловой энергией, образующейся в результате сгорания осадка, что в свою очередь, повышает температуру обжига глинистого сырья в печи;

- изменение предела прочности при изгибе имеет обратную зависимость по сравнению с пределом прочности на сжатие: при введении осадка (4 и 8%) прочность при изгибе по сравнению с контрольными значениями снижается в среднем на 27 и 45% соответственно при температуре обжига 970 °С, и на 22,6 и 35,9% соответственно при температуре обжига 1070 °С.

Основываясь на полученных данных, можно утверждать, что эксперимент воспроизводим, полученные математические зависимости позволяют однозначно оптимизировать состав по содержанию в нём осадка сточных

вод целлюлозно-бумажного производства при заданном (требуемом) значении выбранной целевой функции.

### Заключение

Сравнение полученных данных по прочности исследуемых образцов керамического кирпича с требованиями ГОСТ показал, что при введении осадка сточных вод целлюлозно-бумажного производства в шихту в количестве 4 и 8% масс в качестве выгорающей добавки возможно получение полнотелого керамического кирпича, соответствующего по прочности марке М150-М200. Для точного определения марки полноразмерного керамического кирпича необходимо производство опытной партии в промышленных условиях и испытание образцов в соответствии с требованиями ГОСТ. Однако было установлено, что в результате сгорания осадка в керамической массе при обжиге выделяется дополнительная тепловая энергия, что в свою очередь повышает температуру обжига глинистого сырья в печи и увеличивает прочность образцов на сжатие и изгиб (по сравнению с образцами, обожжёнными при 970 °С). Поэтому, на основании полученных результатов можно утверждать, что при температуре обжига готовых керамических изделий выше 1000 °С возможно получение керамического кирпича, соответствующего марке М150 по ГОСТ 530-2012.

### Литература

1. Тарасов С.М., Азаров В.И., Ковернинский И.Н. Современные тенденции в развитии технологии производства бумаги и картона // Лесной вестник. 2003. № 5. С. 89–92.
2. Дулькин Д.А., Спиридонов В.А., Комаров В.И. Современное состояние и перспективы использования вторичного волокна из макулатуры в мировой и отечественной индустрии бумаги. Архангельск: Изд-во АГТУ, 2007. 1118 с.
3. Coimbra R.N., Paniagua S., Escapa C., Calvo L.F., Otero M. Combustion of primary and secondary pulp mill sludge and their respective blends with coal: A thermogravimetric assessment// Renewable Energy. 2015. V. 83. P. 1050–1058.
4. Méndez A., Fidalgo J.M., Guerrero F., Gasco G. Characterization and pyrolysis behaviour of different paper mill waste materials // Journal of Analytical and Applied Pyrolysis. 2009. V. 86. No. 1. P. 66–73.
5. Мюллер О.Д., Малыгин В.И., Харитоненко В.Т., Кремлева Л.В. Анализ энергетического потенциала

древесных отходов в лесопромышленном комплексе Архангельской отрасли // Известия высших учебных заведений. Лесной журнал. 2010. № 3. С. 94–101.

6. Ширинкина Е.С., Вайсман Я.И., Курило О.Н. Использование энергетического потенциала органических отходов при их сжигании на утилизационных установках // Экология и промышленность России. 2018. № 22 (7). С. 54–58.

7. Болотова К.С. Совершенствование технологии подготовки осадков сточных вод целлюлозно-бумажного производства к сжиганию: Автореф. дис. ... канд. техн. наук. Архангельск: АГТУ. 2009. 19 с.

8. Баталин Б.С., Козлов И.А. Состав для изготовления плит несъемной опалубки // Патент РФ 2323185 С2. Заявка: 2005132296/03, 19.10.2005. Опубликовано: 27.04.2008. Бюл. № 12.

9. Adu C., Jolly M. Developing fiber and mineral based composite materials from paper manufacturing by-products // Smart Innovation, Systems and Technologies. 2017. V. 68. P. 435–444.

10. Eichhorn S.J., Dufresne A., Aranguren M., Marcovich N.E., Capadona J.R., Rowan S.J., Weder C., Thielemans W., Roman M., Renneckar S., Gindl W., Veigel S., Keckes J., Yano H., Abe K., Nogi M., Nakagaito A.N., Mangalam A., Simonsen J., Benight A.S., Bismarck A., Berglund L.A., Peijs T. Review: current international research into cellulose nanofibres and nanocomposites // Journal of Materials Sciences. 2010. V. 45. No. 1. P. 1–33.

11. Huang H.B., Du H.H., Wang W.H., Shi J.Y. Characteristics of paper mill sludge-wood fiber-high-density polyethylene composites // Polymer composites. 2012. V. 16. P. 101–113.

12. Soucy J., Koubaa A., Migneault S., Riedl B. The potential of paper mill sludge for wood plastic composites // Industrial Crops and Products. 2014. V. 54. P. 248–256.

13. Kim S., Kim H.J., Park J.C. Application of recycled paper sludge and biomass materials in manufacture of green composite pallet // Resources, Conservation and Recycling. 2009. V. 53. P. 674–679.

14. Soucy J., Godard F., Rivard P., Koubaa A. Rheological behavior of high-density polyethylene (HDPE) filled with paper mill sludge // Journal of Applied Polymer Science. 2018. V. 135. P. 1–12.

15. Ismail H., Rusli A., Azura A.R., Ahmad Z. The effect of partial replacement of paper sludge by commercial Fillers on natural rubber composites // Journal of Reinforced Plastics and Composites. 2008. V. 27. P. 1877–1891.

16. Chen H.-J., Hsueh Y.-C., Peng C.-F., Tang C.-W. Paper sludge reuse in lightweight aggregates manufacturing // Materials. 2016. V. 9 (11). No. 876. P. 1–9.

17. Козлов И.А. Новые конструкционно-теплоизоляционные материалы на основе скопа – отхода целлюлозно-бумажной промышленности: Автореф. дис. ... канд. техн. наук. Челябинск: Пресстайм, 2009. 23 с.

18. Трещев А.А., Мишунина Г.Е., Липатова Е.С., Кораблин И.М. Керамическая масса // Патент РФ

2300507 С1. Заявка: 2006100855/03, 10.01.2006. Опубликовано: 10.06.2007. Бюл. № 16.

## References

1. Tarasov S.M., Azarov V.I., Koverninskiy I.N. Modern trends in the development of paper and paperboard production technology // Lesnoy vestnik. 2003. No. 5. P. 89–92 (in Russian).

2. Dulkan D.A., Spiridonov V.A., Komarov V.I. Current situation and prospects of using secondary fiber from waste paper in the world and domestic paper industry. Arkhangel'sk: Izd-vo AGTU, 2007. 1118 p. (in Russian).

3. Coimbra R.N., Paniagua S., Escapa C., Calvo L.F., Otero M. Combustion of primary and secondary pulp mill sludge and their respective blends with coal: A thermogravimetric assessment // Renewable Energy. 2015. V. 83. P. 1050–1058.

4. Méndez A., Fidalgo J.M., Guerrero F., Gasco G. Characterization and pyrolysis behaviour of different paper mill waste materials // Journal of Analytical and Applied Pyrolysis. 2009. V. 86. No. 1. P. 66–73.

5. Myuller O.D., Malygin V.I., Kharitonenko V.T., Kremleva L.V. Energy potential analysis of wood waste in forest industry of the Arkhangel'sk Region // Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Lesnoy zhurnal. 2010. No. 3. P. 94–101 (in Russian).

6. Shirinkina E.S., Vaysman Ya.I., Kurilo O.N. Use of the Energy Potential of Organic Waste during its Incineration at Recycling Facility // Ekologiya i promyshlennost Rossii. 2018. No. 22 (7). P. 54–58 (in Russian).

7. Bolotova K.S. Improving the technology of pulp and paper sludge preparation to incineration: Avtoref. ... kand. tech. nauk. Arkhangel'sk: AGTU. 2009. 19 p. (in Russian).

8. Batalin B.S., Kozlov I.A. Composition for manufacture of plates for permanent forms // Patent RU 2323185 C2. Application: 2005132296/03, 19.10.2005. Date of publication: 27.04.2008/ Bull. 12 (in Russian).

9. Adu C., Jolly M. Developing fiber and mineral based composite materials from paper manufacturing by-products // Smart Innovation, Systems and Technologies. 2017. V. 68. P. 435–444.

10. Eichhorn S.J., Dufresne A., Aranguren M., Marcovich N.E., Capadona J.R., Rowan S.J., Weder C., Thielemans W., Roman M., Renneckar S., Gindl W., Veigel S., Keckes J., Yano H., Abe K., Nogi M., Nakagaito A.N., Mangalam A., Simonsen J., Benight A.S., Bismarck A., Berglund L.A., Peijs T. Review: current international research into cellulose nanofibres and nanocomposites // Journal of Materials Sciences. 2010. V. 45. No. 1. P. 1–33.

11. Huang H.B., Du H.H., Wang W.H., Shi J.Y. Characteristics of paper mill sludge-wood fiber-high-density polyethylene composites // Polymer composites. 2012. V. 16. P. 101–113.

12. Soucy J., Koubaa A., Migneault S., Riedl B. The potential of paper mill sludge for wood plastic com-

posites // *Industrial Crops and Products*. 2014. V. 54. P. 248–256.

13. Kim S., Kim H.J., Park J.C. Application of recycled paper sludge and biomass materials in manufacture of green composite pallet // *Resources, Conservation and Recycling*. 2009. V. 53. P. 674–679.

14. Soucy J., Godard F., Rivard P., Koubaa A. Rheological behavior of high-density polyethylene (HDPE) filled with paper mill sludge // *Journal of Applied Polymer Science*. 2018. V. 135. P. 1–12.

15. Ismail H., Rusli A., Azura A.R., Ahmad Z. The effect of partial replacement of paper sludge by commercial

Fillers on natural rubber composites // *Journal of Reinforced Plastics and Composites*. 2008. V. 27. P. 1877–1891.

16. Chen H.-J., Hsueh Y.-C., Peng C.-F., Tang C.-W. Paper sludge reuse in lightweight aggregates manufacturing // *Materials*. 2016. V. 9 (11). No. 876. P. 1–9.

17. Kozlov I.A. New construction and thermal insulation materials based on the sludge – waste of the pulp and paper industry: Avtoref. ... kand. tech. nauk. Chelyabinsk: Presstaym, 2009. 23 p. (in Russian).

18. Treshchev A.A., Mishunina G.E., Lipatova E.S., Korablin I.M. Ceramic mass // Application: 2006100855/03, 10.01.2006. Date of publication: 10.06.2007. Bull. 16 (in Russian).




стенд № В219

**XV ЮБИЛЕЙНАЯ МЕЖДУНАРОДНАЯ  
ВЫСТАВКА ОБОРУДОВАНИЯ И ТЕХНОЛОГИЙ  
ДЛЯ ПЕРЕРАБОТКИ, УТИЛИЗАЦИИ ОТХОДОВ  
И ОЧИСТКИ СТОЧНЫХ ВОД**

**XV ANNIVERSARY INTERNATIONAL EXHIBITION  
OF EQUIPMENT AND TECHNOLOGIES  
FOR WASTE MANAGEMENT, RECYCLING  
AND WASTEWATER TREATMENT**

23–25 october  
23–25 октября

[www.minpromtorg.gov.ru](http://www.minpromtorg.gov.ru)

[www.wasma.ru](http://www.wasma.ru)

## Биомониторинговые возможности микроорганизмов при оценке степени токсичности синтетических поверхностно-активных веществ

© 2018. Л. В. Кондакова<sup>1,2</sup>, д. б. н., профессор, Л. И. Домрачева<sup>2,3</sup>, д. б. н., профессор,  
Т. Я. Ашихмина<sup>1,2</sup>, д. т. н., профессор, В. С. Симакова<sup>3</sup>, аспирант,

<sup>1</sup>Вятский государственный университет,  
610000, Россия, г. Киров, ул. Московская, 36,

<sup>2</sup>Институт биологии Коми НЦ УрО РАН,  
167982, Россия, Республика Коми, г. Сыктывкар, ул. Коммунистическая, 28,

<sup>3</sup>Вятская государственная сельскохозяйственная академия,  
610017, Россия, г. Киров, Октябрьский проспект, 133,  
e-mail: dli-alga@mail.ru

Доказана возможность использования отдельных групп микроорганизмов для выявления степени токсичности синтетических поверхностно-активных веществ (СПАВ), которые используются в качестве автошампуней. Показана высокая чувствительность двух видов цианобактерий *Nostoc paludosum* и *Fischerella muscicola*, применяемых в качестве тест-организмов на действие трёх марок автошампуней. При инкубировании культур цианобактерий в растворах автошампуней с концентрацией, равной рекомендуемой дозе (1 р. д.), происходит резкое падение численности жизнеспособных клеток. Биотестирование с помощью бацилл проводили путём высева бактериальных суспензий на питательный агар с предварительно внесённым лаурилсульфатом натрия (ЛСН). Критерием токсичности служило снижение числа выросших колоний бацилл в опытных вариантах. Индикационным признаком на токсичность СПАВ послужило снижение процента обрастания почвенных комочков бактериями р. *Azotobacter*. Отмечено также снижение видового разнообразия микроскопических водорослей и цианобактерий в почве при действии ЛСН. Наиболее чувствительными к загрязнению почвы ЛСН оказались представители отделов Xanthophyta и Eustigmatophyta. Наибольшее количество видов водорослей наблюдалось в контрольном варианте и в варианте 0,5 р. д. ЛСН.

Полученные результаты по негативному воздействию испытуемых СПАВ на микроорганизмы разной систематической принадлежности доказывают необходимость осторожного обращения с автошампунями на автомойках и при индивидуальном использовании, чтобы исключить возможность их попадания в почву.

**Ключевые слова:** синтетические поверхностно-активные вещества, автошампуни, биотестирование, биоиндикация, цианобактерии, бациллы, альгофлора, *Azotobacter*.

## Biomonitoring capabilities of microorganisms when assessing the degree of toxicity of synthetic surfactants

© 2018. L. V. Kondakova<sup>1,2</sup> ORCID: 0000-0002-2190-686X, L. I. Domracheva<sup>2,3</sup> ORCID: 0000-0002-7104-3337,  
T. Ya. Ashikhmina<sup>1,2</sup> ORCID: 0000-0003-4919-0047, V. S. Simakova<sup>3</sup> ORCID: 0000-0003-0250-1936

<sup>1</sup>Vyatka State University,

36, Moskovskaya St., Kirov, Russia, 610000,

<sup>2</sup>Institute of Biology of the Komi Science Centre of the Ural Branch of RAS,  
28, Kommunisticheskaya St., Syktyvkar, Russia, 167982,

<sup>3</sup>Vyatka State Agricultural Academy,  
133, Oktyabrskiy Prospect, Kirov, Russia, 610017,

e-mail: dli-alga@mail.ru

High sensitivity of the two species of cyanobacteria (*Nostoc paludosum* and *Fischerella muscicola*) as test-organisms by means of stating their hydrogenase activity with the tetrazolium-topographical method was proved; presence of formazan in cyanobacteria living cells served as a marker. It was stated that decrease in species composition of algae and cyanobacteria can serve as a bioindication sign of synthetic surface-active substances in the environment. Formazan

accumulation decreased considerably under the influence of car wash of three trade-marks. When cyanobacteria cultures are incubated in solutions of car shampoos with a recommended dose concentration, the number of viable cells drops sharply. Bioassay with the help of bacilli was carried out by means of bacterial suspension inoculation on nutrient agar with preliminary added sodium lauryl sulfate (SLS). The toxicity criterion consisted in decreasing number of the grown bacilli colonies in experimental variants. It is shown that the degree of toxicity of SLS can be tested using bacteria of the genus *Bacillus*, judging from decrease of the percent of soil-balls encrusting with bacteria of the genus *Azotobacter*.

The representatives of Xanthophyta and Eustigmatophyta were the most sensitive to soil pollution with SLS. The number of algae species was the most in the control variant and in the variant with 0.5 recommended dose of SLS. The results showing negative influence of the tested synthetic surface-active substances on microorganisms with different systematic characteristics proved the fact that it is necessary to carefully use car wash and to avoid car wash getting into soil.

**Keywords:** synthetic surface-active substances (SSAS), car wash, bioassay, bioindication, cyanobacteria, *Bacillus*, algoflora, *Azotobacter*.

К числу поллютантов, объём попадания которых в окружающую среду постоянно возрастает на 2–5% в год, относятся синтетические поверхностно-активные вещества (СПАВ) [1]. Хотя определение степени их токсичности для живых организмов началось сравнительно недавно, установлено, что в некоторых случаях СПАВ являются более опасными загрязнителями среды, чем полагали ранее [2–7]. При этом, как и для других загрязняющих веществ, степень токсичности СПАВ для биоты проводят, используя тест-организмы и организмы-индикаторы различной систематической принадлежности [8]. Однако анализ литературных данных показывает, что среди тестируемых СПАВ практически отсутствуют автошампуни, популярность которых для мойки автомобилей возрастает с каждым годом так же, как и количество автомоек. Поэтому возникает необходимость проведения исследований, связанных с изучением экологических последствий циркуляции автошампуней в окружающей среде.

Цель данной работы – определение характера действия СПАВ на различные группы микроорганизмов и оценка их устойчивости к возрастающим концентрациям автошампуней марок Концентрат, Felix, Uni и лаурилсульфата натрия (ЛСН).

### Объекты и методы

Объектами исследования, которые использовались в качестве тест-организмов на действие изучаемых автошампуней и ЛСН, были 2 вида цианобактерий (ЦБ) *Nostoc paludosum* Kütz № 18 и *Fischerella muscicola* (Thur.) Gom. № 300 из коллекции фототрофных микроорганизмов кафедры биологии растений, селекции и семеноводства, микробиологии Вятской ГСХА, выращенных на питательной среде Громова № 6 без азота в течение 12 недель при температуре 22–24 °С и 12-часовом освещении; а также 2 вида бак-

терий рода *Bacillus* (*B. mesentericus* и *Bacillus* sp.), выделенных из гербарных образцов бурых водорослей и обладающих повышенной устойчивостью к тяжёлым металлам. В качестве организмов-индикаторов выступала альгофлора дерново-подзолистой почвы, образцы которой были отобраны в черте г. Кирова, и бактерии р. *Azotobacter*, присутствующие в почве пойменного и суходольного лугов.

На изучаемые объекты действовали автошампуни и ЛСН в возрастающих концентрациях. Такое вещество, как ЛСН повсеместно начали использовать уже с 1930 г. В настоящее время его используют при производстве мыла, зубных паст и автошампуней. По норме для мойки машин расчётная (рекомендуемая) доза (1 р. д.) составляет 130 мг порошка на 1 л дистиллированной воды. Из автошампуней для исследования были выбраны 3 марки, наиболее часто используемые на рынке г. Кирова: Концентрат, Uni и Felix, для которых 1 р. д. составляет 10, 35 г и 30 г на 1 л воды соответственно.

Для биотестирования степени токсичности СПАВ с помощью ЦБ использован тетразольно-топографический метод [9]. Критерием токсичности служило снижение числа жизнеспособных клеток. Биотестирование с помощью бацилл проводили путём высева бактериальных суспензий на питательный агар с предварительно внесённым ЛСН. Критерием токсичности служило снижение числа выросших колоний бацилл в опытных вариантах.

Индикационная роль азотобактера учитывалась по методике, основанной на учёте обрастания комочков почвы, разложенных в чашках Петри на агаризованной среде Эшби [9]. Критерий токсичности – снижение количества комочков почвы, обросших азотобактером. Метод альгоиндикации основан на постановке почвенных чашечных культур со стёклами обрастания. Критерий токсичности – снижение видового разнообразия водорослей и ЦБ.

Результаты и обсуждение

**Биотестирование автошампуней тетразольно-топографическим методом.** При инкубировании культур ЦБ *N. paludosum* и *F. muscicola* в растворах автошампуней с концентрацией 1 р. д. в течение 24 часов происходит резкое падение численности жизнеспособных клеток (табл. 1). Маркерным признаком таких клеток является накопление в них ярко красных кристаллов формазана, который образуется в результате восстановления бесцветного 2,3,5-трифенилтетразолий хлорида под действием фермента дегидрогеназы. Очень маленький процент мёртвых клеток ЦБ в контрольном варианте (1,0–2,9%) указывает на высокую физиологическую активность тестируемых культур. Поэтому единственной причиной обвального падения жизнеспособности обоих видов ЦБ в опытных вариантах можно считать действие автошампуней, используемых в дозах, применяемых на практике при мойке автомобилей.

Сравнение полученных результатов по вариантам показывает, что наиболее токсичными для ЦБ являются автошампуни Uni и Felix, воздействие которых приводит к гибели от 98,5 до 99,7% клеток. Ингибиторная активность автошампуня Концентрат несколько ниже: в этом варианте гибель клеток *N. paludosum* со-

ставляет 71,8%, а у *F. muscicola* – 94,4%. Для обоих видов ЦБ количество жизнеспособных клеток, которые подвергались действию автошампуней, увеличивается в ряду: Uni > Felix > Концентрат.

Таким образом, данный метод биотестирования показал, что испытанные автошампуни даже в дозах, рекомендуемых для практического использования, вызывают необратимые изменения в клетках ЦБ *N. paludosum* и *F. muscicola*, которые приводят к гибели абсолютного большинства членов цианобактериальной популяции.

**Биотестирование ЛСН с использованием бацилл.** Несмотря на то, что бактерии рода *Bacillus* считаются наиболее устойчивыми микроорганизмами по отношению к различным стресс-факторам, внесение ЛСН в питательную среду привело к резкому снижению их численности (табл. 2). Сила угнетающего эффекта ЛСН на оба штамма бацилл увеличивалась по мере увеличения концентрации поллютанта: для *B. mesentericus* в 407 раз в варианте 2 р. д. и в 19,6 раз – для *Bacillus* sp. при 0,5 р. д. Полное прекращение роста бацилл наблюдалось при 4 р. д. для *B. mesentericus*. Чувствительность *Bacillus* sp. к данному поллютанту была намного сильнее: полное подавление роста наступало уже при 1 р. д. ЛСН. Таким образом, поддержание в музейной

Таблица 1 / Table 1

Влияние автошампуней на количество жизнеспособных клеток цианобактерий (%)  
Car wash influence on the number of viable cells of cyanobacteria (%)

Вид цианобактерий Cyanobacteria species	Вариант Variant			
	Контроль (вода) Control (water)	Uni	Felix	Концентрат Concentrate
<i>Nostoc paludosum</i>	97,1±1,0	0,3±0,02	0,6±0,1	28,2±3,2
<i>Fischerella muscicola</i>	99,0±0,7	0,8±0,1	1,5±0,1	5,6±0,2

Таблица 2 / Table 2

Влияние возрастающих концентраций лаурилсульфат натрия на численность бацилл  
Influence of increasing concentration of sodium lauryl sulfate on bacilli number

Вариант Variant	Численность клеток, КОЕ/мл Cells number, colony-forming units/ml	
	<i>Bacillus mesentericus</i>	<i>Bacillus</i> sp.
Контроль / Control	149600±3500	80400±7200
0,25 р. д. / 0.25 rated dose	14300±1900	5500±400
0,5 р. д. / 0.5 rated dose	11000±1200	4100±600
1,0 р. д. / 1.0 rated dose	6300±960	0
2,0 р. д. / 2.0 rated dose	367±57	0
4,0 р. д. / 4.0 rated dose	0	0

Таблица 3 / Table 3

Влияние возрастающих концентраций лаурилсульфат натрия на степень обрастания комочков почвы пойменного и суходольного лугов бактериями рода *Azotobacter* (%) / Influence of increasing concentration of sodium lauryl sulfate on the degree of soil-balls encrusting with bacteria *Azotobacter* (%) in flood plain meadows and upland meadows

Концентрация СПАВ SSAS concentration	Почва пойменного луга Flood plain meadow soil	Почва суходольного луга Upland meadow soil
Контроль / Control	100	100
0,25 р. д. / 0.25 rated dose	40	34
0,5 р. д. / 0.5 rated dose	31	33
1,0 р. д. / 1.0 rated dose	25	26
2, 0 р. д. / 2.0 rated dose	21	25
4,0 р. д. / 4.0 rated dose	19	10

культуре данных штаммов бацилл позволит успешно использовать их как тест-организмы на различные виды СПАВ, в состав которых входит ЛСН.

**Биоиндикация с помощью бактерий р. *Azotobacter*.** Для изучения интенсивности развития бактерий р. *Azotobacter* под влиянием СПАВ были отобраны образцы почвы пойменного и суходольного лугов. В ходе проведения этого опыта комочки почвы раскладывали на агаризованной среде Эшби (по 50 комочков почвы на чашку Петри в двукратной повторности), в которую предварительно вносили ЛСН в возрастающих концентрациях. О степени ингибирования азотобактера судили по снижению процента обрастания почвенных агрегатов азотобактериальными колониями.

Негативный эффект действия ЛСН по отношению к азотобактеру наблюдался на шестые сутки после постановки опыта (табл. 3). Так, если в контрольном варианте обрастание почвенных комочков составляло 100%, то по мере возрастания концентрации препарата происходило неуклонное снижение этого показателя, достигающего 19% для почвы пойменного луга и 10% – для почвы суходольного луга при 4 р. д. ЛСН.

Таким образом, испытанный метод биоиндикации, основанный на интенсивности развития азотобактера, широко применяемый для диагностики плодородия почвы или токсичности различных поллютантов, приемлем и при испытании ЛСН.

**Альгоиндикация.** Альгоиндикация – приём, основанный на выявлении и сравнении видового состава загрязнённых и «чистых» почв. Критерием степени нарушения почвенных ценозов является уровень снижения видового разнообразия водорослей и ЦБ.

В модельном опыте определяли видовой состав водорослей и ЦБ в образцах дерново-подзолистой среднесуглинистой почвы, ото-

бранной в городской черте, после внесения в неё ЛСН в возрастающих концентрациях.

Всего было обнаружено 17 видов водорослей и ЦБ, принадлежащих к 4 отделам. Таксономическая структура исследуемой альгофлоры имеет следующий вид: Cyanophyta (Cyanobacteria) – 4 вида (23,5%), Xanthophyta – 1 вид (5,9%), Eustigmatophyta – 2 вида (11,8%), Chlorophyta – 10 видов (58,8%). В альгогруппировках более половины спектра составляют виды отдела Chlorophyta, что указывает на бедность таксономического состава водорослей.

Видовой состав водорослей представлен как широко распространёнными видами, так и видами, характерными для дерново-подзолистых почв, которые, как правило, выступают в качестве доминантов и субдоминантов, определяя в целом облик альгофлоры дерново-подзолистой почвы.

Альгофлора исследуемой почвы включала представителей следующих отделов: Cyanobacteria – *Plectonema boryanum* Gom. f. *boryanum*, *Leptolyngbya foveolarum* Anagn. et Kom., *Leptolyngbya augustissima* (W. et G.S. West) Anagn. et Kom., *Nostoc punctiforme* (Ag.) Elenk.; Chlorophyta – *Chlorococcum infusionum* (Schrank) Menegh., *Chlorococcum hypnosporum* Starr, *Pseudococcomyxa simplex* (Mainx.) Fott, *Tetracystis aggregate* Brown et Bold, *Chlorella vulgaris* Beijer., *Chlorella minutissima* Fott et Novakova, *Planktosphaeria gelatinosa* G.M. Smith, *Klebsormidium dissectum* (Gay) Ettl et Gärtner, *Stichococcus minor* Näg. s. str. и *Chlorosarcinopsis minor* (Gern.) Herndon; Xanthophyta – *Pleurochloris commutata* Pasch.; Eustigmatophyta – *Vischeria helvetica* Pasch. и *Eustigmatos magnus* (B. Petersen) Hibberd.

Наиболее чувствительными к загрязнению почвы ЛСН оказались представители Xanthophyta и Eustigmatophyta, которые встречались единично.

Наибольшее количество видов водорослей наблюдалось в контрольном варианте и в варианте 0,5 р. д. ЛСН. Далее с увеличением дозы внесения СПАВ количество видов ЦБ и водорослей снижалось (табл. 4).

В целом, характер альгофлоры несёт черты флоры экосистемы в экстремальных условиях. Во всех вариантах преобладали водоросли из отдела Chlorophyta. Вероятно, именно представители данного отдела наиболее адаптированы к ЛСН. Водоросли отдела Eustigmatophyta наблюдались только в контрольном варианте и при внесении 0,5 р. д. ЛСН. В отделе Xanthophyta наблюдалась еще большая чувствительность фототрофов к ЛСН: вид *Pleurochloris commutata* был обнаружен только в контрольном варианте. Нетипична реакция ЦБ, которые не встречаются уже при 2 р. д., хотя известен феномен цианофитизации фототрофных комплексов при загрязнении

почвы другими поллютантами антропогенного и природного происхождения.

Таким образом, и при загрязнении почвы СПАВ можно использовать видовой анализ водорослей и ЦБ в качестве биоиндикационного признака, как и при других видах антропогенного загрязнения почвы, критерием токсичности испытуемых соединений является снижение видового обилия.

### Заключение

Проведённые исследования показали допустимость применения широко используемых в биомониторинговой практике методов биотестирования и биоиндикация для оценки степени токсичности определённых СПАВ, в частности, автошампуней.

Так, доказана высокая чувствительность двух видов ЦБ (*N. paludosum* и *Fischerella mus-*

Таблица 4 / Table 4

Влияние внесения возрастающих концентраций лаурилсульфат натрия ( в расчётных дозах – р. д.) на видовой состав фототрофной микрофлоры / Influence of input of increasing sodium lauryl sulfate concentrations (in rated doses) on specious composition of phototroph microflora

Группы фототрофов Phototroph groups	Число видов по вариантам Species number in variants				
	Контроль Control	0,5 р.д. 0.5 rated dose	1,0 р. д. 1.0 rated dose	2 р. д. 2 rated dose	4 р. д. 4 rated dose
Cyanobacteria					
<i>Leptolyngbya angustissima</i>	–	+	–	–	–
<i>Leptolyngbya foveolarum</i>	+	–	–	–	–
<i>Nostoc punctiforme</i>	–	+	–	–	–
<i>Plectonema boryanum</i>	+	–	+	–	–
Chlorophyta					
<i>Chlorella minutissima</i>	–	+	–	–	+
<i>Chlorella vulgaris</i>	–	–	+	+	–
<i>Chlorococcum hypnosporum</i>	–	–	–	–	+
<i>Chlorococcum infusionum</i>	+	+	+	+	+
<i>Chlorosarcinopsis minor</i>	–	+	–	–	–
<i>Klebsormidium dissectum</i>	–	+	–	–	–
<i>Planktosphaeria gelatinosa</i>	–	–	–	–	+
<i>Pseudococcomyxa simplex</i>	+	+	–	–	+
<i>Stichococcus minor</i>	–	–	+	–	–
<i>Tetracystis aggregata</i>	+	–	+	–	–
Xanthophyta					
<i>Pleurochloris commutata</i>	+	–	–	–	–
Eustigmatophyta					
<i>Eustigmatos magna</i>	+	+	–	–	–
<i>Vischeria helvetica</i>	+	+	–	–	–
Всего/Total:	8	9	4	2	5

Примечание: Прочерк означает отсутствие вида.  
Note: A strikethrough means absence of the species.

*cicola*) как тест-организмов по определению их гидрогеназной активности тетразольно-топографическим методом с использованием в качестве маркерного признака наличие формазана в живых клетках ЦБ, накопление которого резко снижается под влиянием автошампуней марок Концентрат, Felix и Uni.

Показана возможность тестирования степени токсичности ЛСН с помощью бактерий р. *Bacillus*, резко снижающих свою численность даже при минимальных концентрациях препарата.

Установлено также, что в качестве биоиндикационных признаков на присутствие в среде испытанных СПАВ можно использовать такие показатели, как снижение видового обилия водорослей и ЦБ в почве и снижение процента обрастания комочков почвы бактериями р. *Azotobacter*

Полученные результаты по негативному воздействию испытуемых СПАВ на микроорганизмы разной систематической принадлежности доказывают необходимость очень аккуратного обращения с автошампунями на автомойках и при индивидуальном использовании, чтобы исключить возможность их попадания в почву и предотвратить дополнительный экологический стресс на почвенные микробиомы.

*Работа выполнена в рамках государственного задания Вятского государственного университета «Механизмы адаптации и устойчивости почвенной микробиоты к техногенному воздействию» № 5.4962.2017/Б4.*

### References

- Ostroumov S.A. Proving the crucial role of the biota in improving water quality // *Water: Technology and Ecology*. 2010. No. 1. P. 32–62.
- Sirisattha S., Momose Y., Kitagawa E., Iwahasi H. Toxicity of anionic detergents determined by *Saccharomyces cerevisiae* microarray analysis // *Water Research*. 2004. No. 38. P. 61–70.
- Želimir P., Vidaković-Cifrek Z., Puntarić D.V. Toxicity of surfactants to green microalgae *Pseudokirchneriella subcapitata* and *Scenedesmus subspicatus* and to marine diatoms *Phaeodactylum tricornutum* and *Skeletonema costatum* // *Chemosphere*. 2005. V. 61. No. 8. P. 1061–1068.
- Soares A., Guieysse B., Jefferson B., Cartmell E., Lester J.N. Nonylphenol in the environment: A critical review on occurrence, fate, toxicity and treatment in wastewater // *Environment International*. 2008. V. 34. P. 1033–1049.
- Markina Zh.V., Aizdaicher N.A. The Influence of the detergent ARIEL on growth and physiological state of unicellular algae // *Gidrobiologicheskii zhurnal*. 2009. T. 45. No. 6. P. 52–60 (in Russian).
- Masakoralá K., Turner A., Brown M.T. Toxicity of synthetic surfactant to the marine macroalga *Ulva lactuca* // *Water, Air, Soil Pollut.* 2011. V. 218. P. 283–291.
- Ulloa G., Coutens C., Sánchez M., Sineiro J., Fábregas J., Deive F.J., Rodríguez A., Núñez M.J. On the double role of surfactants as microalgae cell lysis agents and antioxidants // *Green Chemistry*. 2012. No. 4. P. 1044–1051.
- Domracheva L.I., Simakova V.S. Reactions of pro- and eukaryotic microorganisms to the action of synthetic surfactants (review) // *Theoretical and Applied Ecology*. 2018. No. 1. P. 5–17 (in Russian).
- Domracheva L.I., Kondakova L.V., Ashikhmina T.Ya., Ogorodnikova S.Yu., Olkova A.S., Fokina A.I. Using the tetrazolium-topographical method in determining cyanobacteria dehydrogenase activity in polluted environments // *Theoretical and Applied Ecology*. 2008. No. 2. P. 23–28 (in Russian).
- Zenova G.M., Stepanov A.L., Likhacheva A.A., Manucharova N.A. *Practical Soil Biology*. Moskva: Izd-vo MGU, 2002. 120 p. (in Russian).

## Applying songbird population dynamics models to conservation biology needs

© 2018. A. L. Podolsky<sup>1,2</sup> ORCID 0000-0001-7617-0709,

<sup>1</sup>North Carolina State University,  
USA, Raleigh, NC 27695-7313,

<sup>2</sup>Yuri Gagarin State Technical University of Saratov,  
77, Politekhnikeskaya St., Saratov, Russia, 410054,  
e-mail: andrei.podolsky@mail.ru

Proper understanding of the reproductive biology traits and population dynamics patterns of declining songbird species is crucial for ensuring their effective protection and recovery. Metapopulation dynamics may cause the extinction of local populations in some landscape patches regardless of the habitat quality and undertaken conservation measures. At the same time, the source-sink type of the population dynamics could saturate lower quality habitat patches with dispersing individuals from the population sources. Hence, poorer quality habitats presumed to yield population sinks could eventually maintain population sources. Consequently, an effective recovery strategy for declining species should include high quality suitable habitats along with some poorer quality patches in the regional network of protected natural areas.

I developed the mathematical model for songbird reproductive strategy based on the case study of my three-year field research conducted on the Ovenbird (*Seiurus aurocapilla* L.) in the Great Smoky Mountains National Park (U.S.A.). Breeding Bird Survey detected multiannual negative population trends in this species in pristine landscapes of the Southern Appalachians, whereas its growing populations were found in some of the adjacent areas strongly affected by human activities. I modified basic Pulliam's (1988) model of population growth rates for this species by including assumptions about annual female survival and annual fecundity. I also applied productivity data from 110 active nests to determine an average successful brood size and nesting success. Finally, I added probabilistic variables accounting for reneesting rates after unsuccessful breeding attempt and double-brooding rates to the model while assuming equal sex ratio among the breeding individuals. Computer simulations based on actual data and assumed range of values of the model variables yielded population growth rates well below 1, thus confirming the declining status of the national park populations. Therefore, the best pristine habitats in the study area were not ecologically significant sources, and in fact they were ecological traps for this species. Such unpredictable population dynamics in high quality habitats vs. low quality patches could be caused by the "paradox of predation": high quality landscapes of the national park attracted, in addition to birds, a variety of mammalian and reptilian nest predators. Most of these predators were absent or scarce in low quality patches.

**Keywords:** annual fecundity, annual survival, reneesting rate, double-brooding rate, population growth rate, *Seiurus aurocapilla*.

УДК 574.34 + 004.94

## Применение моделей динамики популяций певчих птиц для сохранения биоразнообразия

© 2018. А. Л. Подольский<sup>1,2</sup>, PhD по зоологии и экологии, профессор,

<sup>1</sup> Государственный университет Северной Каролины (США),  
27695, США, Сев. Каролина, г. Роли, п/я 7313,

<sup>2</sup>Саратовский государственный технический университет им. Ю.А. Гагарина,  
410054, Россия, Саратов, ул. Политехническая, 77,  
e-mail: andrei.podolsky@mail.ru

Правильное понимание репродуктивной биологии и популяционной динамики певчих птиц чрезвычайно важно для обеспечения их эффективной охраны и восстановления популяционной численности. Метапопуляционная динамика может привести к исчезновению локальных популяций в некоторых участках ландшафта, независимо от их качества и проводимых охранных мер. В то же время, динамика популяций по типу «источники–раковины» может привести к насыщению местообитаний низкого качества излишком особей, выселяющихся из популяций-источников, а значит, популяции-раковины в менее качественных местообитаниях могут трансформироваться в популяции-источники. Следовательно, эффективная стратегия восстановления видов со снижающейся численностью должна предусматривать включение в региональную сеть охраняемых природных территорий, как высококачественных местообитаний, так и ландшафтов более низкого качества.

Я разработал математическую модель репродуктивной стратегии певчих птиц, основанную на трёхлетних полевых исследованиях певуна-печника (*Seiurus aurocapilla* L.) в национальном парке Грейт-Смоки-Маунтинс (США).

Американский национальный проект по учёту гнездящихся птиц выявил многолетний спад его популяционной численности в нетронутых ландшафтах Южных Аппалачей, тогда как растущие популяции этого вида были обнаружены в смежных районах с преобладанием антропогенных ландшафтов. Я модифицировал базовую модель скорости популяционного роста (Pulliam, 1988), включив в неё годовую выживаемость самок, годовую плодовитость, вероятность повторного размножения после неудачной первой попытки, вероятность второго репродуктивного цикла после успешного первого при условии равного соотношения полов среди размножающихся птиц. Данные по продуктивности 110 активных гнёзд были использованы для расчёта среднего размера успешного выводка и успешности гнездования. Компьютерное моделирование на основе фактических данных и предполагаемого диапазона значений модельных переменных дало темпы роста популяций значительно ниже 1, что объяснило неблагоприятный популяционный статус певуна в национальном парке. Поэтому лучшие нетронутые местообитания в районе исследований не были экологически значимыми источниками, а скорее оказались экологическими ловушками для этого вида. Такая непредсказуемая динамика популяций в высококачественных местообитаниях в сравнении с низкокачественными зонами может быть вызвана «парадоксом хищничества»: высококачественные ландшафты национального парка привлекали разнообразных хищных млекопитающих и рептилий, разоряющих птичьи гнёзда. Большинство из этих хищников отсутствовали или были малочисленны в ландшафтах более низкого качества.

**Ключевые слова:** годовая плодовитость, годовая выживаемость, вероятность повторного размножения, вероятность бицикличности размножения, скорость популяционного роста, *Seiurus aurocapilla*.

An effectiveness of protection and recovery of declining species depends on proper understanding of their reproductive biology traits and population dynamics patterns. Habitats suitable for a certain species alternate with unfavorable habitat patches. The common misconception is that an effective protection of a declining species can be accomplished solely by protecting its best available pristine habitats. According to the theoretical metapopulation paradigm, the regional population is composed of local populations undergoing constant stochastic exchange of individuals [1]. This pattern can lead to the extinction of local populations in selected landscape patches regardless of the habitat quality and undertaken conservation measures. According to the Pulliam's (1988) source-sink concept [2], habitat patches supporting population sources can produce a surplus of individuals dispersing to adjacent poorer quality patches of sink habitats.

Population declines of migratory terrestrial birds in eastern North America are explained mainly by higher rates of predation and brood parasitism in fragmented landscapes [3]. These findings initiated studies of bird reproductive success and source-sink dynamics in contiguous vs. fragmented landscapes [4]. It is important to properly estimate annual fecundity in birds. Hundreds of published studies did not distinguish between nesting success and productivity [5]. Some species of passerines are multibrooded, while some breed only once per year, but certain proportion of individuals in populations of single-brooded species can undertake second broods at the southern extremes of their breeding ranges. Often ignored by population-growth models, renesting after a nest failure and double-brooding may account for up to 40% of annual

fecundity in birds [6]. Hence, failing to consider additional breeding attempts in demographic models can result in underestimates of annual fecundity and population growth rate [7, 8].

Being a common model species for songbird source-sink relationships, the Ovenbird (*Seiurus aurocapilla* L.) is generally considered a single-brooded species [9]. The objectives of my study were to model a source-sink dynamics of the Ovenbird populations in the Great Smoky Mountains National Park (GSMNP), U.S.A., near the southern extent of the species' range, where a longer breeding season may provide greater opportunities for double-brooding. Breeding Bird Survey detected multiannual negative population trends in this species in pristine landscapes of the Southern Appalachians, whereas growing populations were found in some of the adjacent areas affected by human activities [10]. To explain this paradox, I developed a probabilistic model of the Ovenbird annual fecundity based on my field estimates of nesting success, brood size, along with both observed and published estimates of female survival, and rates of renesting and double-brooding. I also wanted to assess how assumptions about these parameters influence estimated population growth rates.

## Methods

### *Building the model*

My seven study sites, cumulatively covering > 700 ha, were located in GSMNP between Gatlinburg, Tennessee, and Waterville, North Carolina. They supported large contiguous tracts of mixed deciduous forest 75–100 years old at elevations from 400 m to 1,100 m above the sea level.

Ricklefs [11] defined annual fecundity ( $F$ ) as the number of juvenile females produced an-

nually per breeding female. Assuming 100% pairing success of females, equal fledgling sex ratio, and a single reproductive cycle with no reneating after a nest failure, annual fecundity can be computed from empirical estimates of the average fledged brood size ( $B$ ) and nesting success ( $p_s$ ) *sensu* Mayfield [12] as:

$$F = \frac{1}{2} B p_s \quad (1)$$

Pulliam [2] defined the finite rate of population growth ( $\lambda$ ) as:

$$\lambda = P_A + P_J F, \quad (2)$$

where  $P_A$  and  $P_J$  are annual survival of adult and juvenile females, correspondingly. For a population at equilibrium  $\lambda = 1$ , and  $\lambda > 1$  for a source population. Published Ovenbird population models include a variety of assumptions about reneating and double-brooding: some studies assumed mono-cyclic reproduction with no reneating [13], while others assumed one reneating after the nest failure [14], or even a 5–10% possibility of double-brooding [15].

I developed a probabilistic single-reneating-double-brooding (SRDB) model of the Ovenbird annual fecundity to explore how variations in rates of reneating ( $p_r$ ) and double-brooding ( $p_d$ ), influence predictions about the population growth rates. Consequently, estimates of  $\lambda$  will vary according to the assumptions about  $p_r$  and  $p_d$ . In this model, females could undertake reneating after previously failed nests and double-brooding after successful nesting with any probability between 0 and 1. A modification of the Pulliam's model [2] to incorporate reneating and double-brooding can be expressed as:

$$\begin{aligned} \lambda &= P_A + \frac{1}{2} P_J [p_s B + p_r (1-p_s) p_r B + p_s^2 p_d B + p_s^2 p_d (1-p_s) p_r B] = \\ &= P_A + \frac{1}{2} P_J B p_s [1 + p_r - p_s p_r + p_s p_d + p_s p_d (1-p_s) p_r] \quad (3) \end{aligned}$$

The SRDB model (Fig. 1) presumes that there are successful ( $p_s$ ) and unsuccessful ( $1-p_s$ ) first nests. While some successful females ( $p_s [1-p_d]$ ) will stop reproducing, other females ( $p_s p_d$ ) will double-brood, and some of those ( $p_s^2 p_d$ ) will succeed. Females that are unsuccessful on their first nesting attempt will reneat with a probability  $p_r$ . Females that reneated successfully,  $p_s (1-p_s) p_r$ , will double-brood with a probability  $p_d$  and will produce  $p_s^2 (1-p_s) p_r p_d B$  offspring. All double-brooding females will stop breeding after

their second nesting attempt, independently of its outcome. The model also assumes a closed population (no dispersal and no recruitment), equal sex ratios, independence of  $P_A$  of  $p_s$ ,  $p_r$  and  $p_d$ , and homogeneity of fledged brood sizes among consecutive breeding attempts. I examined five scenarios of this model based on setting reneating and double-brooding probabilities to 1 or 0, or by using values estimated from the field study:

- (a)  $p_r = 0, p_d = 0$ ;
- (b)  $p_r = 1, p_d = 0$ ;
- (c)  $p_r = \{\text{estimated value}\}, p_d = 0$ ;
- (d)  $p_r = 1, p_d = \{\text{estimated value}\}$ ;
- (e)  $p_r = \{\text{estimated value}\}, p_d = \{\text{estimated value}\}$ .

#### *Estimating model parameters*

In order to estimate annual reproductive success, we searched study sites for nests from mid-April until the end of July following the existing guidelines to collect a representative sample of nests [16, 17]. Nests were monitored every three days until the end of incubation, every other day until day 6 of the nestling stage, and then daily until nests were no longer active. Nests were considered successful only if signs of successful fledging were observed [18]. Reproductive success was estimated by using daily survival rates ( $s_d$ ) and nesting success ( $p_s$ ) *sensu* Mayfield [12] and estimating an average successful brood size ( $B$ ).

$$p_s = s_d^n, \quad (4)$$

where  $n$  is a duration of the period from the beginning of egg-laying to fledging of the offspring. As an alternative, the apparent, or naive, nest depredation was estimated as:

$$D = \frac{N_D}{N_T}, \quad (5)$$

where  $D$  is apparent nest depredation rates,  $N_D$  is No. of depredated nests,  $N_T$  is No. of all nests.

Standard errors of  $s_d$  and test-statistics ( $z$ ) for evaluating variability of  $s_d$  among years, sites, and consecutive breeding attempts were calculated [19]. The confidence interval for  $p_s$  was approximated as a range of values between high and low estimates. I used chi-square tests to evaluate variations of apparent nest depredation, computed from the equation (5), among years, consecutive breeding attempts, and sites. To account for possible effects of temporal and spatial heterogeneity on average clutch size, hatched

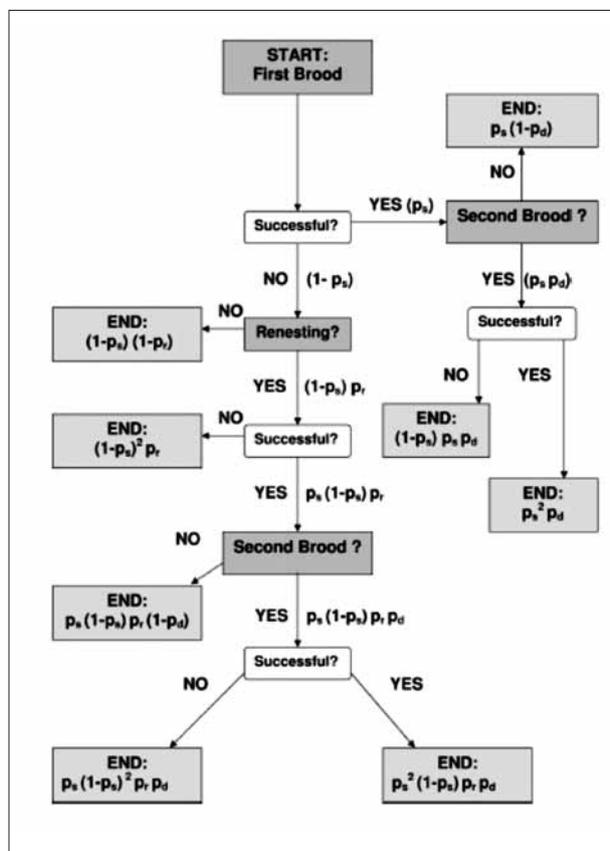


Fig. 1. Flow-chart summary of the SRDB model of annual fecundity

brood size, and fledged brood size, I conducted ANOVA, general linear model. The SRDB model (Fig. 1) is described by the equation (3). It assumes homogeneity of Ovenbird nesting success ( $p_s$ ) and is limited by one renesting attempt after nest failure ( $p_r$ ), while successful first broods and successful renesting attempts after the failed first broods are followed by a second breeding with a probability  $p_d$ .

Estimation of the annual survival of adult and juvenile females was conducted as follows. Although it is possible to estimate the adult survival of songbirds by recapturing marked birds, direct estimates of annual juvenile songbird survival are virtually nonexistent because of high postnatal dispersal [20]. An alternative method based on ratios of after-second-year (ASY) to second-year (SY) birds was used [11]:

$$P_A = \frac{ASY}{ASY+SY} \tag{6}$$

Females were captured on nests using a butterfly net and their age was identified by the shape of the third rectrix [21]. Following Ricklefs [11], I considered the probability of juvenile female survival:

$$P_J = \frac{1}{2} P_A \tag{7}$$

To estimate the probabilities of renesting and double-brooding in SRDB model, I used an indirect approach based on assumptions about the timing of reproduction, the duration of successful breeding attempts, and the length of the breeding season [8]. I used the field data from three years of research to estimate breeding-season length (average time between the earliest nest initiation and the latest fledging) and the duration of a nesting cycle from nest initiation until fledging. I estimated the number of potential successful reproductions per season ( $N$ ) as:

$$N = \frac{T_B}{T_N + \Delta T} \tag{8}$$

where  $T_B$  is the breeding-season length,  $T_N$  is duration of the nesting cycle,  $\Delta T$  is the interval between two consecutive cycles.

Female Ovenbirds arrive on their breeding grounds over an average interval of seven days and start their nests over seven days from the date of arrival [9]. Nests initiated within the first three weeks of the breeding season were considered first broods, nests initiated within the next three weeks were assumed to represent renesting, and nests started from week 7 on were attributed to the second broods. Assuming an independence of nests in my study and constant nest-searching effort, I estimated the probability of renesting as:

$$p_r = \frac{RA}{FB \cdot (1 - p_s)} \tag{9}$$

where RA is No. of renesting attempts, FB is No. of first broods.

Using same assumptions, I assessed the probability of double-brooding  $p_d$  in Ovenbird populations at my study sites as the ratio of second broods to all preceding successful nesting attempts:

$$p_d = \frac{SB}{FB_s + RA_s} \tag{10}$$

where SB is No. of second broods,  $FB_s$  is No. of successful first broods,  $RA_s$  is No. of successful renesting attempts.

## Results

### Reproductive chronology

In three years of field work, 110 Ovenbird nests were found and monitored in GMSNP.

On average among three years, the earliest nest initiation took place on 14 April, while the latest on 20 June, with fledging on 18 July. Therefore, the breeding season of the Ovenbird lasted 96 days. The average nesting cycle lasted 31 days for first broods and 30 days for renesting birds and second broods. Assuming a conservative renesting interval of seven days, the duration of the breeding season at the study sites, according to the equation (8), would allow for two successful broods in a season:  $\frac{96}{38} = 2.5$ . Fig. 2 illustrates how nests in my study were classified among consecutive reproductive attempts. First nests were initiated on 29 April ± 0.5 days (range: 14 April – 4 May;  $n = 62$ ) and fledged on 29 May ± 0.8 days (range: 15 May – 2 June). Renesting peaked on 14 May ± 1.1 days ( $n = 28$ ) with a peak of fledging on 11 June ± 2.3 days. Second broods were estimated to start on 3 June ± 1.7 days ( $n = 20$ ) and fledge on 2 July ± 2.9 days.

In the Figure 2, initiated and fledged nests are shown on a weekly basis. It is clear that the first three weeks represent the initiation of the first broods, renesting started during the weeks

4–6, and the initiation of the second broods following successful first broods and successful renesting attempts occurred during the weeks 7–10.

*Model parameterization*

Annual reproductive success was estimated as follows. On average, Ovenbirds laid  $4.49 \pm 0.07$  eggs per nest (range: 3–6;  $n = 89$ ) and raised  $3.79 \pm 0.19$  fledglings (range: 1–6;  $n = 43$ ) per successful brood. I found no significant site effect on clutch size, brood size, or number of young fledged. Although clutch size varied significantly among years, and both clutch and hatched brood sizes declined significantly over the breeding season (Tables 1 and 2), I found no spatial or temporal heterogeneity in fledged brood sizes and therefore used the same brood size ( $B$ ) for all consecutive reproductive attempts in the SRDB model.

Rates of apparent nest predation did not vary among years, study sites, and consecutive nesting attempts (Tables 1 and 2), and  $s_d$  was not different between the incubation and nestling stages (mean = 0.953;  $z = 0.70$ ,  $P = 0.48$ ). Nest-

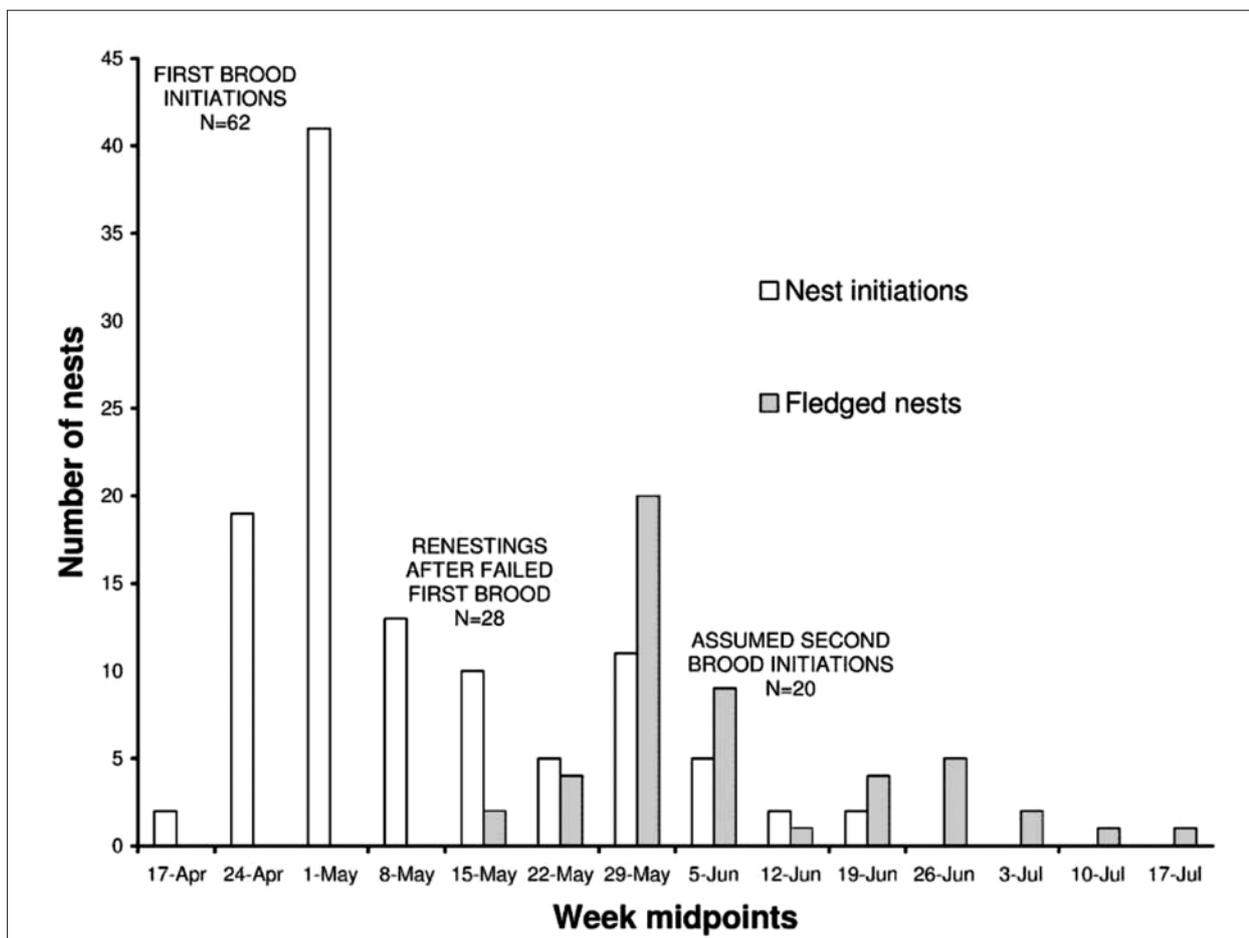


Fig. 2. Timing of Ovenbird reproduction in GSMNP ( $n = 110$  nests)

Table 1

Temporal variation in Ovenbird reproductive parameters and nest depredation rates

Parameters	Statistical comparisons <sup>a</sup>							
	among three years of study				among consecutive broods <sup>b</sup>			
	$\chi^2$	<i>F</i> -value	<i>df</i>	<i>P</i>	$\chi^2$	<i>F</i> -value	<i>df</i>	<i>P</i>
Clutch size	–	5.62	2	< 0.01	–	20.06	2	< 0.001
Hatched brood size	–	0.83	2	0.44	–	7.47	2	< 0.01
Fledged brood size	–	0.02	2	0.98	–	1.14	2	0.33
Nest depredation rates <sup>c</sup>	0.40	–	2	0.82	0.27	–	2	0.88

Note: <sup>a</sup> Chi-square test and ANOVA: general linear model; <sup>b</sup> First broods, reneating after the first nest failure, and second broods; <sup>c</sup> Apparent nest depredation (expressed as the ratios of depredated nests to all nests).

Table 2

Spatial variation in Ovenbird reproductive parameters and nest depredation rates

Parameters	Statistical comparisons among study sites			
	$\chi^2$	<i>F</i> -value	<i>df</i>	<i>P</i>
Clutch size	–	0.43	6	0.86
Hatched brood size	–	0.59	5	0.71
Fledged brood size	–	1.25	5	0.31
Nest depredation rates	0.74	–	4	0.95

Table 3

Annual survival of adult ( $P_A$ ) and juvenile ( $P_J$ ) females, and annual fecundity ( $F$ ) in Ovenbird populations with single reneating and double-brooding (SRDB model)

Estimates <sup>a</sup>	$P_A$	$P_J$	$B$	$s_d$	$p_s$	$F^*$ <sup>b</sup>	$F_{SRDBe}$ <sup>c</sup>
Mean	0.633	0.317	3.79	0.953	0.310	1.16	0.99
Low <sup>d</sup>	0.545	0.273	3.60	0.947	0.266	1.67	0.80
High <sup>d</sup>	0.721	0.361	3.98	0.959	0.362	0.77	1.21

Note: <sup>a</sup> Successful brood size ( $B$ ), daily nest survival rate ( $s_d$ ) and nesting success ( $p_s$ ) were estimated from this study; <sup>b</sup> Equilibrium fecundity of Ovenbirds (i. e. annual fecundity corresponding to  $\lambda = 1$ ); <sup>c</sup> SRDB model-scenario *e* includes rates of reneating ( $p_r = 0.655$ ) and double-brooding ( $p_d = 0.5$ ) estimated from this study; <sup>d</sup> ‘Low’ and ‘high’ values of  $P_A$ ,  $P_J$ ,  $B$ ,  $s_d$ , and  $p_s$  correspond to the lower and upper limits of their estimated 95% confidence intervals, respectively. ‘Low’ and ‘high’ values of  $F$  and  $F^*$  approximate their lower and upper confidence limits. They were computed from either ‘low’ or ‘high’ values of all other parameters in the equation (3).

ing success was estimated from the equation (4) at  $p_s = 0.310$  (range: 0.266–0.362) (Table 3).

Annual Ovenbird female survival was computed using equation (6) from the sample of 30 captured and marked breeding females:  $P_A = 0.633 \pm 0.088$ ,  $P_J = 0.317 \pm 0.044$ . Probabilities of reneating and double-brooding were estimated from my field data using equations (9) and (10):

$$p_r = \frac{28}{62 \cdot (1 - 0.31)} = 0.655;$$

$$p_d = \frac{20}{40} = 0.5 \text{ (Table 3).}$$

I then used the empirical values of  $p_r$  for computing annual fecundity and population

growth rates in the SRDB model scenarios *c* and *e*, while empirical values of  $p_d$  were used for computation of  $F$  and  $\lambda$  in the scenarios *d* and *e*. I applied mean, low, and high estimates of  $B$ ,  $P_A$ ,  $P_J$ , and  $p_s$  for estimating annual fecundity (Table 4). Mean  $F_{SRDBe} = 0.99$  (range: 0.80–1.21) female fledglings per breeding female. The corresponding value of equilibrium fecundity was  $F^* = 1.16$  female offspring per reproducing female (range: 0.77–1.67).

Computer simulations of Ovenbird population growth rates on my study sites in GSMNP based on the SRDB model yielded the following results. Scenario *d* with assumed 100% reneating rate after the nest failure and empirical estimate of double-brooding rate at 50% was

the only scenario to yield lambda approaching 1 ( $\lambda = 0.996$ ; range: 0.801–1.223), i. e. a population at equilibrium. However, assumptions of the scenario *d* can be hardly expected to occur in the Ovenbird populations.

All other scenarios of the SRDB model resulted in much lower population growth rates (Table 4). For example, monocyclic reproduction without reneating (scenario *a*) yielded the lowest  $\lambda = 0.819$  (range: 0.675–0.981), while scenario *e* based on empirical estimates of both reneating and double-brooding rates resulted in  $\lambda = 0.945$  (range: 0.764–1.156).

**Discussion**

*Annual female survival and components of annual fecundity*

Survival estimates based on the recapture of birds marked in previous years are negatively biased because of dispersal [22] and incomplete site fidelity [23]. Of a very few studies that measured annual survival rates of adult Ovenbirds directly, only one study specifically estimated female survival [24], because territorial males are much easier to detect and capture than females. My indirect estimate of adult female survival from the age ratios ( $P_A = 0.633 \pm 0.088$ ) agreed with recent published estimates from unfragmented landscapes based on the band returns ( $0.61 \pm 0.09$  [13];  $0.60 \pm 0.06$  [24]). It appeared to be on the high end of the published estimates that range from 0.02 to 0.85, as reported in Table 3 in Bayne and Hobson [24].

Contrary to some findings, stating that later in the season Ovenbirds breed more successfully [25], I found no evidence of seasonal variability in successful brood size and daily nest survival rates on my study sites. Therefore, I was able to

use the same empirically derived values of these model parameters for consecutive reproductive attempts. Both daily nest survival rates ( $s_d = 0.953 \pm 0.006$ ) and average fledged brood size ( $B = 3.79 \pm 0.19$ ) in my study were derived from large samples, and they were within the range of the published rates for contiguous forested habitats ( $s_d$  and  $B$  ranging 0.945–0.985 and 2.94–4.30, respectively [13–15, 26]).

Direct measurements of reneating and double-brooding rates based on observations of marked birds are very complicated. Within-season dispersal and incomplete site fidelity are poorly studied in this species. They may further confound the estimates [27]. Published data on reneating probabilities of Ovenbirds are virtually non-existent. In my study, there were only three clear instances of double-brooding and one instance of reneating next to a failed nest. My indirect estimates,  $p_r = 0.655$  and  $p_d = 0.5$ , were based solely on nesting chronology. Typically, the Ovenbird is considered a monocyclic species with only a few instances of true second broods ever encountered [9]. Therefore, it was highly unlikely that my computed values of  $p_d$  and, consequently, of annual fecundity were underestimated, even though it was quite possible that, at the southern boundary of the species' breeding range, Ovenbird populations might have a higher  $p_d$  than populations farther north, due to a longer breeding season.

*Population growth models and population trends vs. depredation rates*

Breeding Bird Survey data for the Ovenbird in the southern Appalachian region suggest consistent population declines at an average annual rate of 1.5% while surrounding areas sustain

**Table 4**

Ovenbird population growth rates from the SRDB model (scenarios *a-e*)

Model scenarios <sup>a</sup>	$p_r$ <sup>b</sup>	$p_d$ <sup>c</sup>	$\lambda_{low}$	$\lambda_{mean}$	$\lambda_{high}$ <sup>d</sup>
<i>a</i>	0	0	0.675	0.819	0.981
<i>b</i>	1	0	0.771	0.947	1.146
<i>c</i>	0.655	0	0.739	0.903	1.089
<i>d</i>	1	0.5	0.801	0.996	1.223
<i>e</i>	0.655	0.5	0.764	0.945	1.156

Note: <sup>a</sup> Model scenarios use the estimates of annual adult female survival ( $P_A = 0.633 \pm 0.088$ ), fledged brood size ( $B = 3.79 \pm 0.19$ ), and nesting success ( $p_s = 0.310_{mean}$ ,  $0.266_{low}$ , and  $0.362_{high}$ ) from this study. Annual survival of juvenile females is assumed half of  $P_A$  ( $P_J = 0.317 \pm 0.044$ ): see the equation (7); <sup>b</sup> Reneating rate (ratio of reneating attempts to previously failed nests). Scenarios *c* and *e* use the estimates of  $p_r$  from this study (0.655); <sup>c</sup> Double-brooding rate (ratio of second broods to the sum of successful first broods and successful reneating attempts). Scenarios *d* and *e* use the estimates of  $p_d$  from this study (0.5); <sup>d</sup> Ranges of  $\lambda$ -values represent approximate 95% confidence intervals.

growing populations [10]. Although I observed no evidence of large Ovenbird population changes over three years of research in GSMNP, my data on population growth rates implied negative population trend in this species: all scenarios of the single-renesting-double-brooding model, but one, yielded  $\lambda$  considerably less than 1. Scenario *d* produced population approaching equilibrium, although the assumption of 100% renesting rate seemed highly unrealistic (Table 4). Given strict monitoring protocol, the criteria used to assess nest fates, and large sample sizes, my estimates of  $p_s$  and  $B$  were quite accurate. My indirect empirical estimate of annual female survival complied with published data [24], and along with computed renesting and double-brooding rates, it did not seem to be understated. Therefore, the model parameter causing  $\lambda < 1$  was likely to be the nest survival rate.

Nest depredation is the most common cause of ground-nesting songbird nest failure [28]. Except for two instances of parental birds taken by predators, all other reproductive failures in my study were caused by nest depredation. In most published studies, higher rates of predation are attributed to higher degrees of forested habitat fragmentation [29]. However, this is not always true due to the “paradox of predation” [30]: high quality forests in GSMNP attracted a variety of abundant reptilian, avian, and mammalian predators ranging from voles, wood rats, flying squirrels, and opossums to various snakes, Blue Jays, and even black bears [31]. Therefore, the best pristine habitats of GSMNP were not ecologically significant sources but rather “ecological traps” [32] for the Ovenbird. This species obviously evaluates the habitat quality mainly from visual cues. On the other hand, in some of the affected by human activities adjacent landscapes, breeding success and annual productivity could have been higher, which would explain growing Ovenbird populations reported by Breeding Bird Survey [10], because many of the above predators were absent or scarce in lower quality fragmented forests.

### Implications for future conservation strategies

Although accurate assessment of the population status is crucial for developing demographic models for conservation and management [33], current population models of migratory songbirds are usually based on assumptions about female survival rates and empirical measures of fecundity. They generally ignore the potential

influence of variation in the rates of renesting and double-brooding. Accurate empirical estimates of these parameters could significantly improve an accuracy of the existing songbird population models. Direct methods for estimating these parameters should be used, whenever possible.

The “paradox of predation” could potentially lead to unpredictable population dynamics. Therefore, besides *a priori* assignment of the protected status to the high quality pristine landscapes, an effective strategy for the protection of declining species at the regional level should also include an examination of the specifics of spatial and temporal dynamics of its populations and possible inclusion of the lower quality habitats in the regional network of protected natural areas.

Logically, it could be even necessary to actively protect suitable patches, not inhabited by the species, but which could be subsequently colonized by it as a result of its metapopulation and source-sink dynamics.

### References

1. Hanski I. Metapopulation ecology. New York: Oxford University Press, 1999. 328 p.
2. Pulliam H.R. Sources, sinks, and population regulation // *American Naturalist*. 1988. V. 132. P. 652–661.
3. Askins R.A. Restoring North America’s birds: lessons from landscape ecology. New Haven: Yale University Press, 2000. 320 p.
4. Murphy M.T. Habitat-specific demography of a long-distance, neotropical migrant bird, the Eastern Kingbird // *Ecology*. 2001. V. 82. P. 1304–1318.
5. Thompson B.C., Knadle G.E., Brubaker D.L., Brubaker K.S. Nest success is not an adequate comparative estimate of avian reproduction // *Journal of Field Ornithology*. 2001. V. 72. P. 527–536.
6. Murray Jr. B.G. Measuring annual reproductive success, with comments on the evolution of reproductive behavior // *Auk*. 1991. V. 108. P. 942–952.
7. Nagy L.R., Holmes R.T. To double-brood or not? Individual variation in the reproductive effort in Black-Throated Blue Warblers (*Dendroica caerulescens*) // *Auk*. 2005. V. 122. P. 902–914.
8. Grzybowski J.A., Pease C.M. Renesting determines seasonal fecundity in songbirds: What do we know? What should we assume? // *Auk*. 2005. V. 122. P. 280–291.
9. Van Horn M.A., Donovan T.M. Ovenbird (*Seiurus aurocapillus*) // *Birds of North America* / Eds. A. Poole, F. Gill, D.C. Washington. Academy of Natural Sciences and American Ornithologists’ Union, 1994. No. 88. 23 p.
10. Sauer J.R., Hines J.E., Fallon J. The North American breeding bird survey, results and analysis,

- 1966–2004, version 2005.2. Laurel: U.S. Geological Survey Patuxent Wildlife Research Center, 2005. [Internet resource] <https://www.mbr-pwrc.usgs.gov/bbs/bs2004.html> (Accessed: 01.07.2018).
11. Ricklefs R.E. Fecundity, mortality, and avian demography // *Breeding Biology of Birds* / Ed. D.S. Farner. Philadelphia: National Academy of Sciences, 1973. P. 366–435.
  12. Mayfield H.F. Suggestions for calculating nest success // *Wilson Bulletin*. 1975. V. 87. P. 456–466.
  13. Porneluzi P.A., Faaborg J. Season-long fecundity, survival, and viability of Ovenbirds in fragmented and unfragmented landscapes // *Conservation Biology*. 1999. V. 13. P. 1151–1161.
  14. Donovan T.M., Thompson III F.R., Faaborg J., Probst J.R. Reproductive success of migratory birds in habitat sources and sinks // *Conservation Biology*. 1995. V. 9. P. 1380–1395.
  15. Flaspohler D.J., Temple S.A., Rosenfield R.N. Effects of forest edges on Ovenbird demography in a managed forest landscape // *Conservation Biology*. 2001. V. 15. P. 173–183.
  16. Martin T.E., Geupel G.R. Nest-monitoring plots: methods for locating nests and monitoring success // *Journal of Field Ornithology*. 1993. V. 64. P. 507–519.
  17. Rodewald A.D. Nest-searching cues and studies of nest-site selection and nesting success // *Journal of Field Ornithology*. 2004. V. 75. P. 31–39.
  18. Manolis J.C., Andersen D.E., Cuthbert F.J. Uncertain nest fates in songbird studies and variation in Mayfield estimation // *Auk*. 2000. V. 117. P. 615–626.
  19. Johnson D.H. Estimating nesting success: the Mayfield method and an alternative // *Auk*. 1979. V. 96. P. 651–661.
  20. Greenwood P.J., Harvey P.H. The natal and breeding dispersal of birds // *Annual Review of Ecology and Systematics*. 1982. V. 13. P. 1–21.
  21. Donovan T.M., Stanley C.M. A new method of determining Ovenbird age on the basis of rectrix shape // *Journal of Field Ornithology*. 1995. V. 66. P. 247–252.
  22. Nichols J.D., Noon B.R., Stokes S.L., Hines J.E. Remarks on the use of mark-recapture methodology in estimating avian population size. Estimating Numbers of Terrestrial Birds / Eds. C.J. Ralph, J.M. Scott // *Studies in Avian Biology*. 1981. No. 6. P. 124–136.
  23. Marshall M.R., Diefenbach D.R., Wood L.A., Cooper R.J. Annual survival estimation of migratory songbirds confounded by incomplete breeding site-fidelity: study designs that may help // *Animal Biodiversity and Conservation*. 2004. V. 27. P. 59–72.
  24. Bayne E.M., Hobson K.A. Annual survival of adult American Redstarts and Ovenbirds in the southern boreal forest // *Wilson Bulletin*. 2002. V. 114. P. 358–367.
  25. Faaborg J., Thompson III F.R., Robinson S.K., Donovan T.M., Whitehead D.R., Brawn J.D. Understanding fragmented Midwestern landscapes: the future / Eds. J.M. Marzluff, R. Sallabanks // *Avian Conservation: Research and Management*. Washington, D.C.: Island Press, 1998. P. 193–207.
  26. Manolis J.C., Andersen D.E., Cuthbert F.J. Edge effect on nesting success of ground nesting birds near regenerating clearcuts in a forest-dominated landscape // *Auk*. 2002. V. 119. P. 955–970.
  27. Howlett J.S., Stutchbury B.J.M. Within-season dispersal, nest-site modification, and predation in re-nesting Hooded Warblers // *Wilson Bulletin*. 1987. V. 109. P. 643–649.
  28. Thompson III F.R. Factors affecting nest predation on forest songbirds in North America // *Ibis*. 2007. V. 149. P. 98–109.
  29. Chalfoun D., Thompson III F.R., Ratnaswamy M.J. Nest predators and fragmentation: a review and meta-analysis // *Conservation Biology*. 2002. V. 16. P. 306–318.
  30. Wilcove D.S. Nest predation in forest tracts and the decline of migratory songbirds // *Ecology*. 1985. V. 66. P. 1211–1214.
  31. Farnsworth G.L., Simons T.R. Observations of Wood Thrush nest predators in a large contiguous forest // *Wilson Bulletin*. 2000. V. 112. P. 82–87.
  32. Robertson B.A., Hutto R.L. A framework for understanding ecological traps and an evaluation of existing evidence // *Ecology*. 2006. V. 87. P. 1075–1085.
  33. Ruth J.M., Petit D.R., Sauer J.R., Samuel M.D., Johnson F.A., Fornwall M.D., Korschgen C.E., Bennett J.P. Science for avian conservation: priorities for the new millennium // *Auk*. 2003. V. 120. P. 204–211.

**About the promotion of natural restoration of *Pinus sylvestris* L.**

© 2018. N. P. Savinykh ORCID: 0000-0003-4996-8269  
E. V. Lelekova ORCID: 0000-0002-6397-115X  
M. N. Shakleina ORCID: 0000-0003-3289-1541  
Vyatka State University,  
36, Moskovskaya St., Kirov, Russia, 610000,  
e-mail: savva\_09@mail.ru

The research was carried out in the pine forest of the specially protected natural areas "Medvedsky Bor" in the Nolinsky District of the Kirov Region. One can meet there both typical boron and boreal plant species and some representatives of broad-leaved forests and steppes. We researched the composition of vegetation and flora, as well as the state of *Pinus sylvestris* L. of the overgrown strip that had been formed after the gradual next-but-one belt logging, with contribution to renewal (mineralization) and care (clarification-logging with removal of non-target species). Green-moss and reed vegetation associations prevail there, as it was stated. Vascular plants are analyzed in relation both to humidity and the spectrum of ecologo-coenotic groups. Predominance of mesophilic and xeromesophilic groups was stated, which indicates moisture degree sufficient for seed germination of the xeromesophilic *P. sylvestris* species. Boreal, boron, as well as non-moral and steppe species prevail, which confirms conservation of biodiversity in these forests. The pine undergrowth was analyzed as for its number, vitality; vegetation influence on these indicators was stated. It was found out, per hectare there are 21 thousand young pine plants aged from 4 to 16 years. This 84 times exceeds the required number of trees in the mature community (250 trees per hectare). The vitality of the pine undergrowth is estimated according to the original method, taking into account the age of the plants, their height, the length of last annual increment and the mean annual increment, deviation of lateral shoots from the major axis, presence of re-crowning and yellowed leaves. It is established that there are 17 600 young plants with a high degree of vitality per hectare. It 4.4 times exceeds the plants number required for artificial restoration of pine forests (4000 trees per hectare). These are the trees which can form pine forests with a high appraisal index in the future.

**Keywords:** reforestation, logging, mineralization, undergrowth, real vitality, forest care, biodiversity.

УДК 630

**О содействии естественному возобновлению *Pinus sylvestris* L.**

© 2018. Н. П. Савиных, д. б. н., профессор,  
Е. В. Лелекова, к. б. н., с. н. с., М. Н. Шаклеина, старший лаборант,  
Вятский государственный университет,  
610000, Россия, г. Киров, ул. Московская, 36,  
e-mail: savva\_09@mail.ru

Исследования проведены в сосновых лесах особо охраняемой природной территории «Медведский бор» Нолинского района Кировской области, где наряду с типичными боровыми и бореальными видами растений встречаются представители широколиственных лесов и степей. Изучен состав растительности и флоры, состояние подроста *Pinus sylvestris* L. на зарастающей полосе, формирующейся после проведённой чересполосной постепенной рубки с последующим возобновлением, содействием возобновлению (минерализация) и уходом (рубка осветления). Установлено преобладание зеленомошниковых и вейниковых ассоциаций растительности; рассмотрены особенности естественного возобновления сосны в них. Выявлено преобладание мезофильной группы, бореальных и боровых растений; сохранение и восстановление степных и неморальных видов. С учётом возраста растений, высоты, длины последнего годового и среднегодового приростов, угла отхождения боковых побегов от главной оси, наличия перевершинивания и пожелтевшей хвои оценена реальная жизненность особей. Установлена эффективность мероприятий: пятикратное превышение численности подроста с высокой жизненностью в сравнении с нормой высадки семян при искусственном восстановлении сосняков; возможность непрерывного интенсивного долговременного неистощительного лесопользования с сохранением экосистемных функций соснового леса и его биоразнообразия.

**Ключевые слова:** лесовосстановление, рубки, минерализация, подрост, реальная жизненность, уход за лесом, биоразнообразие.

The growing demand in wood resources, as well as their constant decrease on the territories accessible by transport, are the reasons of shortening the time of growing technically ripe wood and increasing wood productivity, which would make using wood profitable [1–10]. Thus it is really topical nowadays to look for and research the ways of intensifying natural wood restoration, especially of coniferous forests. Pine forests are one of the main wood sources in Russia. Due to natural processes they eventually transform into zonal forests, mostly spruce ones. Original pine forests can be kept by means of special forestry practices.

It is especially important for specially protected natural areas (SPNA) where change of forest type leads to shortening biodiversity on all the levels. SPNA “Medvedsky Bor” in the Nolinsky District of the Kirov Region is situated on inland sand dunes on the second and third terraces above floodplain of the left bank of the Vyatka River. It contains the representatives of the first (southern) migration zone of pine which got there during Holocene from the Southern-Ural refugium [11]. These are forests of a high growth class and good technological qualities of high log grade.

One of the ways of protecting these pine forests consists in gradual next-but-one belt logging (NBL), when the forest stand of the same class is cut down in two-four stages on the belts with the length not exceeding the height of mature trees, the belts change each other in a certain order [7]. Unlike traditionally kept certain generative individuals on clean loggings, the trees of the belts are cross-pollinated enough and are more windfall-proof; also there appear viable seeds [12–15].

Research of this type of felling aiming at keeping pine forests of the Medvedsky Bor began with working out the methods of assessing vital capacity of the young growth and analyzing its state [16]. From 2013 on the research is being carried out according to the above-mentioned methods. The aim of this research is to assess efficiency of natural regeneration of *P. sylvestris* after NBL (winter 2006), soil mineralization (2007), and cleaning loggings (2015) with eliminating the trees of the untargeted species: birch, aspen, and spruce in the 30<sup>th</sup> unit of the 111<sup>th</sup> planning quarter. To achieve the goal a number of tasks were set: to analyze the influence of above-the-surface soil vegetation cover on development of pine young growth, to assess vitality of these plants and efficiency of natural *P. sylvestris* regeneration.

## Materials and methods

The field research was carried out in autumn 2017 on a bluejoint-cowberry-greenmoss logging. 18 sample areas of the size 4 m<sup>2</sup>, with the gross area 72 m<sup>2</sup> were formed and researched. The areas were formed in different types of associations (with green moss, lichens, blue joint dominating). Vitality of *P. sylvestris* undergrowth was assessed on the basis of field research and cameral data treatment. In the field we assessed the age of the plant (B), its height (H), length of the latest annual increment (AI) and the branch union angle (A) was stated; the presence of re-crowning (R) during the whole life of the tree (dying off of the terminal bud which is followed by axis growing by means of one of the auxiliary buds) and yellowing of fir-needles on two-three summer shoots (X).

Taking into account all the indexes the general vitality (GV) of the trees was characterized that reflects the state of a certain tree this year, irrespective of its age. Good GV (1 point) is shown by the following indexes: no re-crowning; AG is over 5 cm; A is acute; absence of yellow needles; needles live over 3 years. Satisfactory GV (2 points): one re-crowning; AG is 3–5 cm; A is acute; absence of yellow needles; needles live not less than 3 years. Unsatisfactory GV (3 points): several re-crownings; AI is not less than 3 cm; A is oblique; there are either no yellow needles, or there are some on 3-year-old annual growths; needles live 1–2 years. If not all the features of a plant correspond to a certain point, GV was stated either according to the majority of three of them, or according to the most vitally important ones (A, R, AI).

During cameral treatment real vitality of the plants ( $\Sigma$ ) was estimated in points: the state of each plant, taking into account its age. The following indexes were used: GV point; presence and number of re-crowning during the latest three years (1 point – not at all; 2 points – one; 3 points – two or more); the mean annual increment (MAI: height divided by age) and the length of the latest annual increment (AI). Individual plants of *P. sylvestris* different in age have different indexes of the latest AI, as well as of the MAI, thus they were assessed according to age periods of the plant [17]. The trees under 5 years: 1 point – increment is or over 5 cm; 2 points – increment is 3–5 cm; 3 points – increment is less than 3 cm. The trees from 5 to 20 years: 1 point – increment is or over 9 cm; 2 points – 5–9 cm; 3 – less than 5 cm.

Table 1

Vitality of individuals of the undergrowth of *Pinus sylvestris*

No.	The main parameters of the plants							Real vitality, points				
	A, years	H, cm	R	A	AI, cm	AGav, cm	X	R	AIA	MAI	AI	Σ
1	11	187	–	acute	36	27	–	1	1	1	1	4

The real vital power of a certain tree was assessed by means of summing up all the points. The less the number of points is, the better (Table 1).

This method was used to assess all the undergrowth individuals of *P. sylvestris* of the area.

### Results of the research

#### Composition of vegetation and flora.

There are the following associations in the vegetation of the logging: with green mosses prevailing – greenmoss, lichen-greenmoss, cowberry-greenmoss, bluejoint-cowberry-greenmoss, sedge-greenmoss, clubmoss-bilberry-greenmoss-sphagnum, greenmoss-lichen, bluejoint-greenmoss; with bluejoint prevailing – greenmoss-bluejoint, blooming sally-bluejoint, cowberry-bluejoint, greenmoss-blooming sally with bluejoint.

Flora includes 75 plant species: 66 vascular (14 tree and shrubby species, 52 subshrub and grass species) and 9 species of mosses and lichens. There were found 6 groups of vascular plants according to the hydric factor [18]. One species *Melampyrum sylvaticum* L. is hemiparasite. Mesophilic plants prevail (46 species); there are 11 xeromesophilic species, 4 hygromesophilic species, 2 hygrophilous species; there is also 1 mesoxerophilous species and 1 mesohygrophilous species. This indicates that logging sites are humid enough for pine seed germination, pine is a xeromesophilic species.

As for the content of ecological-coenotic groups (ECG), i. e. groups of plant species similar as for their reaction to a set of certain ecological factors typical for certain biotopes characterized by a high degree of association [19], the flora of the Medvedsky Bor is also diverse. All the species are represented in seven ECGs. Boreal species prevail (23 species). There is one oligotrophic species, there are 3 tall-grass species and 6 meadow-fringe-of-the forest species. In the Medvedsky Bor the typical boreal plant groups neighbor with coniferous, nemorose, and steppe plant groups. In monitoring it is topical to consider these groups separately, as they deter-

mine high bio-diversity of the SPNR “Medvedsky Bor”. The coniferous group is represented by 20 species: *Calamagrostis epigejos* (L.) Roth., *C. arundinacea* (L.) Roth., *Veronica officinalis* L., *Lychnis flos-cuculi* L., *Chimaphila umbellata* (L.) W.P.C. Barton, *Campanula rotundifolia* L., *Antennaria dioica* (L.) Gaertn., *Polygonatum odoratum* (Mill.) Druce., *Juniperus communis* L., *Pteridium aquilinum* (L.) Kuhn, *Dactylorhiza maculata* (L.) Soo, *Pulsatilla patens* (L.) Mill., *Viscaria vulgaris* Bernh., *Pinus sylvestris* L., *Gnaphalium sylvaticum* L., *Arctostaphylos uva-ursi* (L.) Spreng., *Viola rupestris* F.W. Schmidt., *Rumex acetosella* L., *Hieracium umbellatum* L., *Hieracium vulgatum* Fries. Nemorose group contains 9 species: *Quercus robur* L., *Viburnum opulus* L., *Convallaria majalis* L., *Tilia cordata* Mill., *Platanthera bifolia* (L.) L.C. Rich., *Poa nemoralis* L., *Carex pilosa* Scop., *Carex digitata* L., *Aegopodium podagraria* L. There are 4 steppe species: *Astragalus arenarius* L., *Eremogone saxatilis* (L.) Ikonn., *Chamaecytisus ruthenicus* (Fisch. ex Woł.) Klask., *Trommsdorffia maculata* (L.) Bernh.

Thus the main specific ECGs of forest plants of the SPNA “Medvedsky Bor” are naturally preserved on the logging, and bio-diversity is sustained on the whole. Natural pine regeneration is provided by keeping the edicator of these forests on the territory under research.

**Undergrowth Characteristics.** All in all on the territory under research we found 158 young trees from 1 to 16 years old, they are quite equally spaced on the whole territory of the area, excluding waterlogged hollows, mostly with deadwater. The age of the undergrowth varies. 12–16 year-old plants are a surviving undergrowth of the original communities; 11 year-old plants appeared after NBL; 10 year-old and younger plants appeared after soil mineralization. Special attention was paid just to these age groups of plants which appeared there after different forest management activities.

The most plants have dark-green needles. There are very few yellowed needles. Side branch union angles are mostly acute. Growth of shoot system is unstable monopodial: at the beginning stages of development, usually more than once,

re-crowning takes place. But this feature spoils life of just 29% individuals, and just a little bit. We think that in the future the undergrowth of this category will be able to live through all the ontogeny stages and form a timber stand of high quality.

The analysis of the undergrowth state, depending on the types of plant associations, showed the following results. On all the *greenmoss* areas of the logging there are many young *P. sylvestris* trees growing quite close to each other. There are 47 trees which are 8–16 years old (30% of all the trees under research). Separate 5–6 year-old plants trees die as a result of natural selection. The most trees are 11 years old. These are high (up to 360 cm) trees with a high AI (up to 60 cm) of an individual. 83% plants have the best indexes of real vitality (4–5 points), actually all 11 year-old plants are included here. The index of vitality of 3 trees is 6, of 2 trees – 7. Three 8–10 year-old trees have 9 points. These are stunted plants (16–28 cm), with the mean annual increment less than 3 cm, and they are most likely to naturally get lost from the wood stand.

On the areas with *greenmoss-lichnes and lichens-greenmoss cover* there are also quite many undergrowth individuals. Seedlings are few. There are 24 plants from 9 to 15 years old (15% of the total). 11–12 year-old individuals prevail. The index of real vitality is mostly 4–5 points (75%). Three individuals with one re-crowning have 6-point vitality, one individual – 7 points. There are just two individuals (9 and 12 year-olds which are 31 and 72 cm high) with low vitality (9 points).

On the areas with *sedge-greenmoss and clubmoss-bilberry-greenmoss-sphagnum cover* there are few undergrowth individuals. There are few plants younger than 10 years. There are 10 young plants 10–12 years old (6%). 11 year-old individuals prevail, they are all tall (up to 287 cm), with a high AI. 8 of them have a high degree of vitality (4–5 points); two – 6 and 7.

On the areas with *cowberry-greenmoss, bluejoint-greenmoss and greenmoss-blooming sally with bluejoint* types of vegetation 10–13-year-old plants prevail. On the sites under research there were found 35 3–14-year-old individuals (22%), mostly 11-year-olds; they are all tall (up to 276 cm), with the AI up to 57cm. Re-crowning mostly takes place at initial stages of development (at the age of 4–5) and it does not influence the index of real vitality so far. On these areas plants with high vitality prevail (91%).

Seed germination and undergrowth development suffer from negative influence of gramine-

ous plants: *Poa nemoralis*, *Calamagrostis arundinacea* and *C. epigejos*. They afford sod, firm the forest litter and upper part of the soil layer with rootstock. Sandy-loam soils of the area under research contribute to their development. On some sites of the territory graneous plants form a kind of a mattress.

On the areas with *bluejoint* the undergrowth is thinned. Here 9–13-year-old individuals prevail. After mineralization on separate sites there are groups of germinated seedlings and of one-three-year-old plants. There are 42 individuals from 1 to 15 years old there (27% of the total number). 11-year-old plants prevail there: with AI over 60 cm, they are tall (up to 290 cm), with the best indexes of real vitality (69% plants have 4–5 points), at times with one-two re-crownings at the initial stages of development.

Per hectare the energy of natural regeneration in the greenmoss associations is 6 times higher than that of the necessary number of mature trees; in the areas with bluejoint it is 5 times higher. They appeared after pine felling and mineralization and they are about the same age; there are few younger individuals. Evidently, in course of time, increase of the degree of projective cover and herbaceous layer density leads to reduction of natural regeneration energy.

The analysis of one-three-year-old plants according to the given method showed that their indexes, because of their little annual and mean annual increment, are higher, and, consequently, their real vitality is less. Thus they are not that relevant at the analysis of undergrowth on the whole, alongside with older plants. So we calculated the vitality index of only 150 individuals from 4 to 16 years old (Table 2). Per hectare it is 21.000 individuals.

9–13-year-old plants prevail. 36% of the total is 11-year-olds. They are the tallest, with the best indexes of real vitality. They appeared as a result of a through-belt logging in 2006. 12–13-year old individuals account for 27%, at the moment of research their vitality indexes are high or the highest. There are 23% trees which are 9–10 years old, they appeared after soil mineralization.

The most plants have *the annual increment* from 16 to 25 cm, quite a few – from 26 to 36 cm. 8% individuals have maximum annual increment which is over 46 cm (some – up to 60 cm). Only 4% dwarf plants aged 9–10 and 12 from interdunal lowlands have annual increment which is less than 5 cm. Clearing logging with elimination of non-target wood species, which took place in 2015, had a positive influence on

Table 2

Indicators of real vitality of *Pinus sylvestris* plants of different ages

Age, years	Number of plants	Real vitality, points				
		4–5	6	7	8	9
4	3	1	2	–	–	–
5	1	–	–	1	–	–
6	1	1	–	–	–	–
8	5	2	1	1	–	1
9	10	5	2	1	–	2
10	25	21	2	–	1	1
11	54	53	1	–	–	–
12	27	23	2	–	1	1
13	14	11	2	1	–	–
14	6	6	–	–	–	–
15	3	3	–	–	–	–
16	1	1	–	–	–	–
Total amount	150	127	12	4	2	5
	%	85	8	3	1	3

Note: “–” – plants with such indicators do not exist.

forming AI, which considerably exceed the range of indexes stated by [17]. Increments of the latest two years of many plants are much higher than the previous ones; only 14% individuals have had a re-crowning. Actually all the auxiliary buds developed into surculus.

Mean annual increment of the most plants ranges from 6–15 to 16–25 cm. Maximum range of indexes here is 26–35 cm. 4% individuals have minimal increment (1–3 cm).

Real vitality indexes of 85% of 4–16 year-old plants are high on the territory under research. Per hectare it is 17.600 individuals. 9–13 year old individuals also have the best vitality index (Table 2). It is them which are to become sound mature trees in the future.

Thus efficiency of natural regeneration in conditions of these kinds of activity is high. According to the Forest Regeneration Rules of the Natural Resources Ministry of the RF it is necessary to plant not less than 4.000 pine plants per ha [20]. This number is considerably exaggerated due to natural die-off of young plants. The research results (21.000 individuals per ha) showed that this norm is more than five time increased in course of natural regeneration in conditions of NBL with the following contribution to natural regeneration and care.

According to the forest resource management indexes, normal state of pine forests requires 250 trees per ha [21]. Comparing this number with the data of the research it was stated that natural regeneration energy 84 times ex-

ceeds this number. Just one year can be required to provide natural forest stand regeneration in case of abundant seed production in conditions of NBL with the following measures of forest regeneration and care.

In course of forest management this type of logging can be used as one of possible ways of natural pine regeneration on the territory of the Medvedsky Bor, preserving the original forest communities and forests’ eco-systematic functions.

### Conclusion

1. At greenmoss and bluejoint fellings natural pine regeneration after NBL in conditions of constant support of regeneration is sufficient (according to the norms for artificial planting).

2. Vitality of the undergrowth, which was formed during and after the measures taken, is stable and high.

3. In case of taking all the necessary measures of forest management, the formed undergrowth is able to form communities with a high appraisal index.

4. NBL provides keeping the specious and phytocoenotic bio-diversity.

Thus gradual next-but-one belt loggings with the following regeneration and complete elimination of the trees, soil mineralization measures, and clearance loggings are quite effective and can take place on the territory of the SPNA “Medvedsky Bor”. In such conditions

pine forests naturally regenerate. Alongside with different forest regeneration measures it provides continuous intensive long-term sustainable forest management.

### References

1. Delaney J.R. Development of forest renewal standards for forest regeneration in Manitoba // Manitoba Natural Resources. 1995. 43 p.
2. Esseen P.-A., Ehnström B., Ericson L., Sjöberg K. Boreal forests. Ecological Bulletins. 1997. No. 46. P. 16–47.
3. Linder P., Jonsson P., Niklasson M. Tree mortality after prescribed burning in an old-growth Scots pine forest in northern Sweden // Silva Fennica. 1998. No. 32 (4). P. 339–349.
4. Jalonen J., Vanha-Majamaa I. Immediate effects of four different felling methods on mature boreal spruce forest understory vegetation in southern Finland // Forest Ecology and Management. 2001. No. 146. P. 25–34.
5. Sippola A.-L., Lehesvirta T., Renvall P. Effects of selective logging on coarse woody debris and diversity of wood-inhabiting fungi in eastern Finland // Ecological. 2001. No. 49. P. 243–254.
6. Kuuluvainen T. Disturbance dynamics in boreal forests: defining the ecological basis of restoration and management of biodiversity // Silva Fennica. 2002. No. 36 (1). P. 5–12.
7. Vidyakin A.I. Natural renewal of pine during gradual felling in the subzone of coniferous-broad-leaved forests of the Vyatka-Kama interfluve // Agrarnyi vestnik Urala. 2012. No. 11. P. 56–57 (in Russian).
8. Yan X.L., Bao W.K., Pang X.Y., Zhang N.X., Chen J. Regeneration strategies influence ground bryophyte composition and diversity after forest clearcutting // Annals of Forest Science. 2013. No. 70 (6). P. 845–861.
9. Savinykh N.P., Perestoronina O.N., Shabalkina S.V. System approach in maintaining pine forests of specially protected natural areas // Vestnik Tverskogo gos. universiteta. 2014. V. 19. P. 5. P. 1559–1562 (in Russian).
10. Savinykh N.P., Perestoronina O.N., Galvas A.G. Forest management in protective forests as a way to preserve ecosystems // Conservation of forest ecosystems: problems and their solutions: materialy Vserossiyskoy nauchno-prakticheskoy konferentsii. Kirov, 2017. P. 192–197 (in Russian).
11. Vidyakin A.I. Migration in the Holocene and population structure of *Pinus sylvestris* L. in the East of the European part of Russia // Zhizn populyatsiy v geterogennoy srede. Yoshkar-Ola. 1998. P. 2. P. 4–12 (in Russian).
12. Strand L. Pollen dispersal // Silvae Genet. 1957. V. 6. P. 129–136.
13. Sarvas R. Investigations on the flowering and seed crop of *Pinus sylvestris* // Comm. Inst. For. Fenn. 1962. V. 53. No. 4. P. 1–198.
14. Koski V. A study of pollen dispersal as a mechanism of gene flow in conifers // Comm. Inst. For. Fenn. 1970. No. 4. 70 p.
15. Lanner R.M. Seed dispersal in *Pinus* // Ecology and biogeography of *Pinus*. 1998. P. 281–295.
16. Savinykh N.P., Zykin A.E. Assessment of the state of phytocenosis according to the vitality of individuals in the growth of edificators // Actual problems of regional environmental monitoring: sbornik materialov Vserossiyskoy nauchnoy shkoly. Kirov, 2004. P. 231–233 (in Russian).
17. Serebryakov I.G. Ecological morphology of plants: Life forms of angiosperms and conifers. Moskva: Vysshaya shkola, 1962. 378 p. (in Russian).
18. Tarasova E.M. Flora of the Vyatka region. Vascular plants. Kirov: Kirovskaya oblastnaya tipografiya, 2007. P. 1. 440 p. (in Russian).
19. Smirnova O.V., Khanina L.G., Smirnov V.E. Ecological-cenotic groups in the vegetation cover of the forest belt of Eastern Europe // Vostochnoevropeyskie lesa: istoria v golotsene i sovremennost. Moskva, 2004. Kniga 1. P. 165–175 (in Russian).
20. Forest plan of the Kirov region: Explanatory note. Kirov, 2008. V. 1. 284 p. (in Russian).
21. Martynov A.N., Melnikov E.S., Kovyazin V.F., Anikin A.S. The basics of forest management and mensuration. Sankt-Peterburg: Lan, 2012. 432 p. (in Russian).

## Изменение почвенной актинобиоты под влиянием инвазии борщевика Сосновского

© 2018. Е. В. Товстик<sup>1</sup>, к. б. н., доцент, с. н. с.,  
 И. Г. Широких<sup>1, 2, 3</sup>, д. б. н., профессор, в. н. с.,  
 Е. С. Соловьёва<sup>1</sup>, к. б. н., доцент,  
 А. А. Широких<sup>1, 2</sup>, д. б. н., профессор, в. н. с.,  
 Т. Я. Ашихмина<sup>1, 3</sup>, д. т. н., профессор, зав. лабораторией,  
 В. П. Савиных<sup>1, 4</sup>, д. т. н., профессор, член-корреспондент РАН,  
<sup>1</sup>Вятский государственный университет,  
 610000, Россия, г. Киров, ул. Московская, 36,  
<sup>2</sup>Федеральный аграрный научный центр Северо-Востока им. Н. В. Рудницкого,  
 610007, Россия, г. Киров, ул. Ленина, 166а,  
<sup>3</sup>Институт биологии Коми научного центра Уральского отделения РАН,  
 167982, Россия, Республика Коми, г. Сыктывкар, ул. Коммунистическая, 28,  
<sup>4</sup>Московский государственный университет геодезии и картографии,  
 105064, Россия, г. Москва, ул. Гороховский пер., 4,  
 e-mail: tovtik2006@inbox.ru, irgenal@mail.ru

Отдельные виды растений, а также растительные сообщества могут существенно влиять на структуру и разнообразие почвенных микробных сообществ. Актиномицеты являются неотъемлемым компонентом почвенной микробной системы, осуществляющей важные экологические функции, связанные, в числе прочих, с трансформацией органического вещества. Настоящее исследование было проведено для выявления различий в структуре почвенных актиномицетных комплексов между участками, заросшими борщевиком Сосновского (*Heracleum sosnowskyi* Manden.) и неинвазированными (контрольными) участками. Отмечено увеличение родового и видового разнообразия актиномицетов в инвазированных почвах, по сравнению с контролем, в частности представители рода *Streptosporangium* встречались исключительно на захваченных борщевиком участках. На этих же участках отмечено увеличение доли окрашенных видов стрептомицетов, представляющих секцию и серию *Cinereus Chromogenes*, тогда как в стрептомицетном комплексе контрольных почв по долевого участию доминировали не продуцирующие пигментов представители секции и серии *Cinereus Achromogenes*. Выявленные различия могут быть связаны с усиленной минерализацией органического вещества в почвах под зарослями борщевика.

**Ключевые слова:** *Heracleum sosnowskyi* Manden., почва, инвазия, актиномицеты, общая численность, видовое разнообразие, структура комплекса.

## The change in soil actinobiote under the influence of *Heracleum sosnowskyi* invasion

© 2018. E. V. Tovstik<sup>1</sup> ORCID: 0000-0003-1861-6076, I. G. Shirokikh<sup>1, 2, 3</sup> ORCID: 0000-0002-3319-2729,  
 E. S. Soloveva<sup>1</sup> ORCID: 0000-0001-9222-7752, A. A. Shirokikh<sup>1, 2</sup> ORCID: 0000-0002-3319-2729,  
 T. Ya. Ashikhmina<sup>1, 3</sup> ORCID: 0000-0003-4919-0047, V. P. Savinykh<sup>1, 4</sup> ORCID: 0000-0002-3259-6721,  
<sup>1</sup>Vyatka State University,  
 36, Moskovskaya St., Kirov, Russia, 610000,  
<sup>2</sup>Federal Agricultural Research Center of North-East named N.V. Rudnitsky,  
 166a, Lenin St., Kirov, Russia, 610007,  
<sup>3</sup>Institute of Biology of Komi Scientific Centre of the Ural Branch  
 of the Russian Academy of Sciences,  
 28, Kommunisticheskaya St., Syktyvkar, Russia, 167982,  
<sup>4</sup>Moscow State University of Geodesy and Cartography,  
 4, Gorokhovskiy Pereulok, Moscow, Russia, 105064,  
 e-mail: tovtik2006@inbox.ru, irgenal@mail.ru

Certain plant species, as well as phytocenosis, can significantly influence the structure and diversity of soil microbiocenosis. Actinomycetes are an integral component of a soil microbiocenosis that carries out important environmental functions, inter alia, with the transformation of organic matter. This study was carried out to reveal differences in the structure of soil actinomycetes complexes between sites overgrown with the *Heracleum Sosnowskyi* Manden. and non-invasive (control) plots. An increase in genus and species diversity of actinomycetes in invaded soils was noted, compared with control, in particular, the representatives of the genus *Streptosporangium* were found exclusively on hogweed-occupied plots. The appearance of *Streptosporangium* in the structure of soils actinomycete complexes under hogweed may indicate that hogweed root exudates contain compounds attractive for this mycelial prokaryotes genus. On the same plots, an increase in the proportion of colored streptomycetes representing the section and series of *Cinereus Chromogenes* was noted, whereas in the control soils streptomycetin complex, the non-producing pigments were dominated by representatives of the section and series of *Cinereus Achromogenes*. In the areas of mass growth of *Heracleum Sosnowskyi*, in comparison with the control plots, a lower carbon content in the soil was noted, which, in addition to the changes in the structure of actinomycete complexes, confirms the fact of intensive organic matter mineralization in soils under the hogweed. Despite the considerable above-ground biomass, at the end of vegetation the removal of nutrients is not replenished by the hogweed plant litter.

**Keywords:** *Heracleum sosnowskyi* Manden., soil, invasion, actinomycetes, total number, species diversity, structure of the complex.

Проблема биологических инвазий в настоящее время приобретает всё большую значимость во всём мире [1]. Прежде всего, это связано с увеличением количества случаев интродукции, а также экспансии чужеродных видов организмов, создающих прямую угрозу биологическому разнообразию естественных экосистем, ведущих к потере их экономической значимости [2].

Изменение абиотических факторов среды, высокие репродуктивные способности, повышающие конкурентоспособность чужеродных видов, способствуют усилению их биологических инвазий [3–5]. Взаимодействие с почвенным микробным сообществом также может увеличить инвазивность через обратную связь растений с почвой [6]. Для некоторых инвазивных видов растений отмечают тесную связь между их лёгким вторжением и отсутствием в почве патогенных для них микроорганизмов [3]. Одним из механизмов повышения конкурентоспособности чужеродных растений является их симбиоз с микоризными грибами, а также азотфиксирующими бактериями [7, 8]. В то же время инвазия чужеродных видов растений возможна и без участия их естественных симбионтов. Исследования микробно-растительных взаимодействий, особенно среди инвазивных популяций растений, играют важную роль в понимании, почему некоторые генотипы более успешны, чем другие [9, 10].

*Heracleum sosnowskyi* Manden – один из самых опасных для человека инвазивных видов растений [11, 12]. Его распространение в некоторых странах Европы, а также в отдельных регионах РФ в настоящее время приобрело масштаб экологического бедствия [13–16]. Известно, что в процессе жизнедеятельности различные части этого растения производят

соединения, обладающие широким спектром биологической активности [17, 18]. Попадая в почву с корневыми экссудатами, многие из них способны влиять на микробные сообщества [19, 20].

Целью данной работы являлось сравнительное изучение структуры и разнообразия актиномицетных комплексов почв на участках массового роста *Heracleum sosnowskyi* Manden. и свободных от него (контрольных).

### Объекты и методы

Образцы дерново-подзолистых почв для исследования отбирали на участках массового роста *H. sosnowskyi* вблизи г. Кирова (N 058°030,380' E 049°036,683') и в Фалёнском районе Кировской области (N 058°021,558' E 051°033,533') (участки №№ 1 и 3 соответственно). Контролем служили образцы почв под разнотравными луговыми сообществами, отобранные за пределами участков массового роста борщевика Сосновского (участки №№ 2 и 4 соответственно в г. Кирове и Фалёнском районе). Отбор почвенных образцов для анализа проводили в летний период на глубину 0–20 см, включая толщу дернины.

В почве определяли численность актиномицетов методом посева из разведений почвенных суспензий на плотные питательные среды с применением селективных приёмов [21]. Родовую структуру актиномицетных комплексов характеризовали на среде с пропионатом натрия, видовую структуру рода *Streptomyces* – на казеин-глицериновом агаре. Родовую и видовую идентификацию культур проводили в соответствии с определителями, используя морфологические и культуральные признаки [22, 23]. Для характеристики структуры комплексов использовали показатели частоты

встречаемости и долевого участия отдельных таксонов [24].

Наряду с микробиологическим анализом определяли содержание органического вещества и  $pH_{KCl}$  почвенной вытяжки, согласно общепринятым методикам [25].

Статистическую обработку результатов проводили с использованием программы EXCEL.

### Результаты и обсуждение

По данным химического анализа, кислотность почв, отобранных в черте г. Кирова ( $pH_{KCl}$  6,8 и 6,9) существенно уступала кислотности почв, отобранных в Фалённом районе ( $pH_{KCl}$  4,4 и 4,6), что согласуется с представлениями о подщелачивающем влиянии загрязняющих веществ городской среды даже на кислые от природы зональные почвы. В то же время, различий по кислотности между почвами под моносообществом *H. sosnowskyi* и на контрольных участках, ни в одном из обследованных экотопов не выявлено. Таким образом, влияние борщевика на почвенную актинобиоту исследовали в почвах, различающихся степенью кислотности: близкой к нейтральной и в среднекислой. Исследуемые почвы различались также по содержанию органического вещества ( $C_{орг.}$ ): под борщевиком Сосновского (участки №№ 1 и 3) значения  $C_{орг.}$  были достоверно ниже (соответственно 5,9 и 6,5%), чем на контрольных участках ( $C_{орг.}$  7,8 и 14,2% для участков №№ 2 и 4 соответственно), что возможно связано с отсутствием постоянной подстилки в инвазивных зарослях

борщевика [19]. Кроме того, условия в сообществах борщевика не способствуют развитию трав нижнего яруса из-за сильного затенения и аллелопатического воздействия [26]. Единственным источником органических веществ в почве под борщевиком являются его зимующие мощные стержневые корневые системы.

В почвах, отобранных в черте города, при посеве почвенных суспензий на среду с пропионатом натрия, регистрировали численность актиномицетов, на порядок более низкую ((от  $8,08 \pm 1,69$  до  $8,66 \pm 1,40$ )  $\cdot 10^5$  КОЕ/г), чем в почвах, отобранных в удалённом от города Фалённом районе ((от  $17,67 \pm 2,72$  до  $20,72 \pm 1,97$ )  $\cdot 10^5$  КОЕ/г) (табл. 1). Разницы между почвами под борщевиком и почвами под многовидовым луговым сообществом по численности актиномицетов не обнаружено.

В отличие от общей численности, родовое разнообразие актиномицетов, характеризуемое индексом Шеннона (H), зависело от растительного сообщества. По сравнению с почвами контрольных участков (H от  $0,96 \pm 0,04$  до  $1,03 \pm 0,03$  бит/г) родовое разнообразие в почвах под моносообществами борщевика Сосновского было выше (H от  $1,03 \pm 0,03$  до  $1,14 \pm 0,01$  бит/г).

Кроме того, если в структуре актиномицетных почвенных комплексов контрольных участков обнаружены на родовом уровне представители всего трёх таксонов (*Streptomyces*, *Micromonospora* и олигоспоровые виды), то в почвах под моносообществами борщевика их количество увеличилось до четырёх за счёт представителей рода *Streptosporangium*. Появление стрептоспорангиумов в структуре

Таблица 1 / Table 1

Характеристика комплексов актиномицетов на участках массового роста борщевика Сосновского  
Characteristics of actinomycetes complexes in areas of mass growth of *Heracleum sosnowskyi* Manden.

Растительное сообщество Plant community	№ участка Site No.	Общая численность актиномицетов, $\times 10^5$ КОЕ/г The total number of actinomycetes, $\times 10^5$ CFU/g	Частота встречаемости / доленое участие, % Frequency of occurrence / share of participation, %				Индекс Шеннона, бит/г Shannon index, bit/g
			<i>Streptomyces</i>	<i>Micromonospora</i>	<i>Streptosporangium</i>	олигоспоровые формы oligospermia forms	
Моносообщества борщевика Mono-communities of <i>H. sosnowskyi</i>	1	$8,66 \pm 1,40$	100/45,2	100/54,2	40/0,2	60/0,4	$1,03 \pm 0,03$
	3	$17,67 \pm 2,72$	100/60,0	100/36,9	20/0,1	100/3,0	$1,14 \pm 0,01$
Многовидовые луговые сообщества Multi-species meadow communities	2	$8,08 \pm 1,69$	100/39,3	100/60,0	0/0	80/0,7	$0,96 \pm 0,04$
	4	$20,72 \pm 1,97$	100/62,2	100/36,7	0/0	100/1,1	$1,03 \pm 0,03$

Таблица 2/ Table 2

Характеристика структуры комплексов стрептомицетов на участках массового роста борщевика Сосновского / Characteristics of the structure of streptomycetes complexes in the areas of mass growth of *Heracleum sosnowskyi* Manden.

Растительное сообщество Plant community	№ участка Site No.	Частота встречаемости / долевое участие, % Frequency of occurrence / share of participation, %						Индекс Шеннона, бит/г Shannon index, bit/g
		1*	2	3	4	5	6	
Моносообщества борщевика Mono-communities of <i>H. sosnowskyi</i>	1	100/16,5	40/3,2	0/0	100/26,7	100/24,2	100/29,4	2,03±0,15
	3	100/8,3	100/17,5	0/0	100/21,1	100/4,9	100/48,1	1,84±0,09
Многовидовые луговые сообщества Multi-species meadow communities	2	100/19,6	0/0	60/1,6	100/32,7	100/24,5	100/21,6	1,87±0,14
	4	100/13,7	80/5,9	0/0	100/10,1	100/4,9	100/65,4	1,54±0,06

Примечание / Note: \* 1 – *Cinereus Achromogenes*; 2 – *Cinereus Chromogenes*; 3 – *Cinereus Violaceus*; 4 – *Helvolo-Flavus Helvolus*; 5 – *Albus Albus*; 6 – *Imperfectus*.

актиномицетных комплексов почв под борщевиком, которые отличаются по кислотности и содержанию органического углерода от почв контрольных участков, может свидетельствовать о том, что в корневых экссудатах и/или корневом опаде борщевика присутствуют соединения, привлекательные для представителей этого рода мицелиальных прокариот.

Известно, что в актиномицетных комплексах зональных типов почв количественно преобладают стрептомицеты [22]. По результатам наших исследований, на участках №№ 1 и 3, в отличие от участков №№ 2 и 4, доминировали по относительному обилию представители рода *Micromonospora* (54,2 и 60,0% соответственно), что можно рассматривать как результат подщелачивающего влияния городской среды, а не воздействия на почву борщевика. В более кислых почвах Фалёнского района соотношение олигоспоровых и моноспоровых форм оставалось типичным для большинства зональных типов почв. Олигоспоровые виды, несмотря на высокую частоту встречаемости (от 60 до 100%), были представлены в долевого отношении незначительно (0,7–3,0%), поэтому отнесены к минорным компонентам в комплексе.

В зависимости от географического положения участка и вида растительного сообщества различалась в почвенных комплексах и видовая представленность рода *Streptomyces* (табл. 2). Так, в почвах контрольных участков, не подвергнутых массовому зарастанию борщевиком, видовое разнообразие стрептомицетов, характеризуемое индексом Шеннона, было заметно ниже (1,87±0,14 и 1,54±0,06 бит/г), чем в почвах, отобранных под моносообществами борщевика (2,03±0,15 и 1,84±0,09 бит/г).

Различия актиномицетных комплексов, в зависимости от растительного сообщества, имелись также в долевого участии видов стрептомицетов, принадлежащих отдельным цветовым секциям и сериям. В почвах под моносообществами *H. sosnowskyi* (участки №№ 1 и 3), различающихся по показателям рН и  $C_{орг}$ , стрептомицетные комплексы были представлены видами пяти, одних и тех же, секций и серий. К числу общих закономерностей можно также отнести то, что в результате инвазии борщевика, по сравнению с контрольными участками, снижалось в структуре комплекса долевого участие представителей серии *Cinereus Achromogenes* на фоне увеличения доли видов серии *Cinereus Chromogenes*.

### Заключение

В ходе исследования установлено, что инвазия борщевика изменяет структуру почвенных актиномицетных комплексов. На участках, подверженных инвазии борщевика Сосновского, по сравнению с неинвазированными участками, происходит увеличение родового и видового разнообразия актиномицеты. Отличительной особенностью почв под моносообществами борщевика, по сравнению с контрольными участками, явилось наличие в комплексе представителей рода *Streptosporangium*.

На участках массового роста борщевика, по сравнению с почвами под разнотравными луговыми сообществами, в стрептомицетном комплексе отмечали снижение долевого участия представителей секции и серии *Cinereus Achromogenes* на фоне увеличения доли пиг-

ментированных видов *Cinereus Chromogenes*. Кроме того, на участках массового роста борщевика Сосновского, по сравнению с контрольными участками, отмечено более низкое содержание углерода в почве, что наряду с выявленными изменениями в структуре актиномицетных комплексов, подтверждает факт интенсивной минерализации органического вещества в почвах под борщевиком. Несмотря на значительную надземную биомассу, по окончании вегетации вынос питательных веществ не восполняется растительным опадом борщевика. При длительном сохранении данная тенденция может вести к снижению и даже утрате почвой потенциального плодородия.

*Работа выполнена при поддержке гранта Президента Российской Федерации для государственной поддержки молодых учёных – кандидатов наук (МК-2880.2018.5).*

### References

- Mack R.N., Simberloff D., Lonsdale W.M., Evans H., Clout M., Bazzaz F.A. Biotic invasions: causes, epidemiology, global consequences, and control // *Ecological Applications*. 2010. No. 3. P. 689–710.
- Oduor A.M.O., Leimu R., Kleunen M. Invasive plant species are locally adapted just as frequently and at least as strongly as native plant species // *Journal of Ecology*. 2016. V. 104. No. 4. P. 957–968.
- Van der Putten W.H., Klironomos J.N., Wardle D.A. Microbial ecology of biological invasions // *ISME J*. 2007. V. 1. P. 28–37.
- Van der Putten W.H. Impacts of soil microbial communities on exotic plant invasions // *Trends Ecol. Evol.* 2010. V. 25 (9). P. 512–519.
- Orrock J.L., Dutra H.P., Marquis R.J., Barber N. Apparent competition and native consumers exacerbate the strong competitive effect of an exotic plant species // *Ecology*. 2015. V. 96. No. 4. P. 1052–1061.
- Klironomos J.N. Feedback with soil biota contributes to plant rarity and invasiveness in communities // *Nature*. 2002. V. 417. P. 67–70.
- Callaway R.M., Thelen G.C., Rodriguez A., Holber W.E. Soil biota and exotic plants invasion // *Nature*. 2004. V. 427. P. 731–733.
- Parker M.A. Mutualism as a constraint on invasion success for legumes and rhizobia // *Divers. Distrib.* 2001. V. 7. P. 125–136.
- Kowalski K.P., Bacon C., Bickford W., Braun H., Clay K.K., Leduc-Lapierre M., Lillard E., McCormick M.K., Nelson E., Torres M., White J., Wilcox D.A. Advancing the science of microbial symbiosis to support invasive species management: a case study on Phragmites in the Great Lakes // *Frontiers in microbiology*. 2015. V. 6. P. 1–14.
- Bahadori M.B., Dinparast L., Zengin G. The genus *Heracleum*: a comprehensive review on its phytochemistry, pharmacology, and ethnobotanical values as a useful herb // *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*. 2016. V. 15. No. 6. P. 1018–1039.
- Weryszko-Chmielewska E., Chwil M. Localisation of furanocoumarins in the tissues and on the surface of shoots of *Heracleum sosnowskyi* // *Botany*. 2017. V. 95. No. 11. P. 1057–1070.
- Jaworek A.K., Michalek K., Wojas-Pelc A. Phytophotodermatitis caused by *Heracleum sosnowskyi* with erythema multiforme-like lesions // *Przegląd Dermatologiczny*. 2017. V. 104. No. 1. P. 16–21.
- Luneva N.N. Sosnovski's hogweed in the Russian Federation // *Zashchita i karantin rasteniy*. 2014. No. 3. P. 12–18 (in Russian).
- Afonin A.N., Luneva N.N., Li Yu.S., Kotsareva N.V. Ecological and geographical analysis of the distribution and occurrence of Sosnovski's Hogweed (*Heracleum sosnowskyi* Manden) in connection with the degree and the environment // *Ekologiya*. 2017. No 1. P. 66–69 (in Russian).
- Baranova O.G., Brelgina E.N. Invasive plant species in three cities of the Udmurt Republic // *Rossiyskiy zhurnal biologicheskikh invaziy*. 2016. V. 7. No. 1. P. 8–11 (in Russian).
- Softysiak J., Brej T., Tomczyk M. Invasion of the Sosnowsky hogweed (*Heracleum sosnowskyi* Manden) In Siechnice commune (South-western Poland) and prospects of its eradication // *Zeszyty Naukowe Uniwersytetu Wrocławskiego in Wrocław – Biology and Animal Breeding*. 2015. V. 78. No. 610. P. 73–86.
- Mishyna M., Laman N., Prokhorov V., Maninang J.S., Fujii Y. Identification of octanal as plant growth inhibitory volatile compound released from *Heracleum sosnowskyi* fruit // *Natural Product Communications*. 2015. V. 10. No. 5. P. 771–774.
- Synowiec A., Kalemb D. Composition and herbicidal effect of *Heracleum sosnowskyi* essential oil // *Open Life Sciences*. 2015. V. 10. P. 425–432.
- Glushakova A.M., Kachalkin A.V., Chernov I.Y. Soil yeast communities under the aggressive invasion of Sosnowsky's hogweed (*Heracleum sosnowskyi*) // *Eurasian soil science*. 2015. V. 48. No. 2. P. 201–207.
- Stojanovi V., Petrovi S., Kovaevi J., Stojanovi D., Bjedov I. *Heracleum sosnowskyi* Manden (Apiaceae) – a new invasive species in the flora of Serbia // *Glasnik umarskog fakulteta. Beograd*. 2017. No. 116. P. 215–220.
- Zenova G.M. Soil actinomycetes of rare genera. Moskva: Izd-vo MGU, 2000. 81 p. (in Russian).
- Gauze G.F., Preobrazhenskaya T.P., Sveshnikova M.A., Terekhova L.P., Maksimova T.S. The determinant of actinomycetes. The geni *Sreptomycetes*, *Streptovercillum*, *Chainia*. Moskva: Nauka, 1983. 248 p. (in Russian).
- The determinant of bacteria Berdzhi. In 2 v. / Eds. Dzh. Khoul't, N. Krig, P. Snit, Dzh. Steyli, S.S. Uillyams. Moskva: Mir, 1997. V. 2. 800 p. (in Russian).
- Zvyagintsev D.G., Zenova G.M. Ecology of actinomycetes. Moskva: GEOS, 2001. 257 p. (in Russian).
- Mineev V.G. Agrochemistry: a textbook. 2 edition, revised and supplemented. Moskva: Izdatelstvo Moskovskogo gosudarstvennogo universiteta, Kolos. 720 p. (in Russian).
- Bochkarev D.V., Nikolskiy A.V., Smolin N.V. Transformation of floodplain meadow phytocenosis during the introduction into it of the adventive weed species – *Heracleum sosnowskyi* // *Vestnik Altayskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta*. 2014. No. 7. P. 36–40 (in Russian).

## Preliminary data about algae and cyanobacteria of volcanic soils on Kuril Islands

© 2018. K. V. Ilchibaeva<sup>1</sup> ORCID: 0000-0003-3400-2517<sup>†</sup>

D. F. Kunsbaeva<sup>1</sup> ORCID: 0000-0001-6649-2069<sup>†</sup>, R. Z. Allaguvatova<sup>1</sup> ORCID: 0000-0002-6850-6767<sup>†</sup>

A. I. Fazlutdinova<sup>1</sup> ORCID: 0000-0001-7971-6690<sup>†</sup>, O. V. Polokhin<sup>2</sup> ORCID: 0000-0002-5519-5808<sup>†</sup>

L. A. Sibirina<sup>2</sup> ORCID: 0000-0001-5217-6866<sup>†</sup>, A. A. Gontcharov<sup>2</sup> ORCID: 0000-0003-2918-730X<sup>†</sup>

P. Singh<sup>3</sup> ORCID: 0000-0001-9884-7741<sup>†</sup>, L. A. Gaysina<sup>1,4</sup> ORCID: 0000-0002-0920-6449<sup>†</sup>

<sup>1</sup>M. Akmullah Bashkir State Pedagogical University,

3-a, Okt'yabrskoy revoliucii, Ufa, Republic of Bashkortostan, Russia, 450008,

<sup>2</sup>Federal Scientific Center of the East Asia Terrestrial Biodiversity,

Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences,

159, 100-letiya Vladivostoka St., Vladivostok, Russia, 690022,

<sup>3</sup>Banaras Hindu University,

Varanasi, Uttar Pradesh, India, 221005,

<sup>4</sup>All-Russian Research Institute of Phytopathology,

5 Institute St., B. Vyazyomy, Odintsovo district, Moscow Region, Russia, 143050,

e-mail: lira.gaisina@mail.ru

Fifty-five species from five phyla (Cyanobacteria – 8, Chlorophyta – 29 (Chlorophyceae – 14, Trebouxiophyceae – 11), Bacillariophyta – 19, Streptophyta – 1, Ochrophyta – 2 (Xanthophyceae – 1, Eustigmatophyceae – 1)) were revealed during the study on biodiversity of cyanobacteria and algae from terrestrial habitats of Urup, Paramushir, Iturup, and Simushir (Kuril Islands). Algal flora of Iturup Islands was the most divers with 25 species, 23 species were found on Urup, 17 on Simushir, and 14 on Paramushir Islands. Number of species per sample decreased from Urup (3.6) to Simushir (2.1), Paramushir (2.0) and Iturup (1.9). Five species, cf. *Mychonastes homosphaera*, *Chlorella vulgaris*, *Dictyococcus varians*, *Bracteacoccus minor*, and *Desmodesmus abundans* were encountered on each of the Island. In the same time species composition of cyanobacteria and algae on each Island was specific and reflected ecological peculiarities of the habitats. The most notable feature of algal and cyanobacterial flora of studied Islands was prevalence of cosmopolitan species tolerant to toxic volcanic substrates. Besides, this territory was characterized by high diversity of amphibian diatom algae. For understanding biodiversity of terrestrial algae and cyanobacteria of Kuril Islands further molecular-genetic research are necessary.

**Keywords:** Kuril-Kamchatka Trench, volcanic soils, eruption, resistance, spatial-ecological patterns, cf. *Mychonastes homosphaera*, *Chlorella vulgaris*, amphibian diatom algae

УДК 574.23

## Предварительные сведения о водорослях и цианобактериях вулканических почв Курильских островов

© 2018. К. В. Ильчибаева<sup>1</sup>, магистрант, Д. Ф. Кунсбаева<sup>1</sup>, магистрант,

Р. З. Аллагуватова<sup>1</sup>, магистрант, А. И. Фазлутдинова<sup>1</sup>, к. б. н., доцент,

О. В. Полохин<sup>2</sup>, к. б. н., с. н. с., Л. А. Сибирина<sup>2</sup>, к. с.-х. н., с. н. с.,

А. А. Гончаров<sup>2</sup>, д. б. н., директор, Р. Синх<sup>3</sup>, профессор,

Л. А. Гайсина<sup>1,4</sup>, д. б. н., доцент,

<sup>1</sup>Башкирский государственный педагогический университет им. М. Акмуллы,  
450008, Россия, Уфа, ул. Октябрьской революции, 3-а,

<sup>2</sup>Федеральный Центр биоразнообразия наземной биоты Восточной Азии ДВО РАН,  
690022, Россия, Владивосток, Проспект 100-летия Владивостока, 159,

<sup>3</sup>Бенаресский индуистский университет,  
221005, Индия, Утта Прадеш, Варанаси,

<sup>4</sup>Всероссийский научно-исследовательский институт фитопатологии,  
143050, Россия, Московская область, Одинцовский район, р.п. Большие Вяземы, ул. Институт, 5,  
e-mail: lira.gaisina@mail.ru

При исследовании биоразнообразия водорослей и цианобактерий наземных местообитаний островов Уруп, Парамушир, Итуруп и Симушир (Курильские острова) было обнаружено пятьдесят пять видов, относящихся к пяти отделам: Cyanobacteria – 8, Chlorophyta – 29 (Chlorophyceae – 14, Trebouxiophyceae – 11), Bacillariophyta – 19, Streptophyta – 1, Ochrophyta – 2 (Xanthophyceae – 1, Eustigmatophyceae – 1). Альгофлора Итурупа была наиболее разнообразной и насчитывала 25 видов, 23 вида было обнаружено на Урупе, 17 видов – на Симушире, и 14 видов – на Парамушире. Число видов в пробе уменьшалось в ряду Уруп (3,6) – Симушир (2,1) – Парамушир (2,0) – Итуруп (1,9). Пять видов – cf. *Mychonastes homosphaera*, *Chlorella vulgaris*, *Dictyococcus varians*, *Bracteacoccus minor*, *Desmodemus abundans* – встречались на всех островах. В то же время, альгофлора каждого острова отличалась своеобразием и отражала экологические особенности местообитания. Характерной чертой альгофлоры исследованных островов было преобладание видов-космополитов, устойчивых к токсичному вулканическому субстрату. Кроме того, обнаружено большое разнообразие амфибиальных видов диатомовых водорослей. Для оценки биоразнообразия наземных водорослей и цианобактерий Курильских островов необходимы дальнейшие молекулярно-генетические исследования.

**Ключевые слова:** Курило-Камчатский жёлоб, вулканические почвы, извержение, устойчивость, пространственно-экологическая структура, cf. *Mychonastes homosphaera*, *Chlorella vulgaris*, амфибиальные диатомовые водоросли.

## Introduction

Volcanic activity greatly affects the terrestrial ecosystems by introducing various chemical elements with volcanic emissions, altering the temperature regime, transforming existing, creating new landscapes and forms of life [1, 2]. Algae and cyanobacteria are the first organisms, settling on the lifeless substrates and initialing the succession [3–7]. Kuril Islands belong to Kuril-Kamchatka Trench (Kuril-Kamchatka volcanic belt, Kuril-Kamchatka volcanic arc) – one of the Earth’s most seismically active regions. Morphogenetic types of relief of Kuril archipelago were formed under influence of the complex interactions of modern tectonic processes and volcanic activity, lithologo-stratigraphic complexes, climate and ocean fluctuations during the Quaternary period [8]. The Islands have a maritime monsoon climate that is greatly affected by air circulation and temperature regime of the Sea of Okhotsk. During the winter Kurils are under the influence of Siberian anticyclone that causes severe windy weather. In summer the Islands are influenced by oceanic air masses characterized by high temperature and humidity. A unique combination of geographical position, features of geology, relief and climate pose peculiarities of Kuril Islands flora.

Natural conditions of the Kuril Islands are not uniform. Northern Kurils belong to oceanic sector of the northern boreal subzone. This territory is characterized by a unique type of vegetation, alder bushes [9]. Central Kurils are the most severe, inaccessible and the least studied

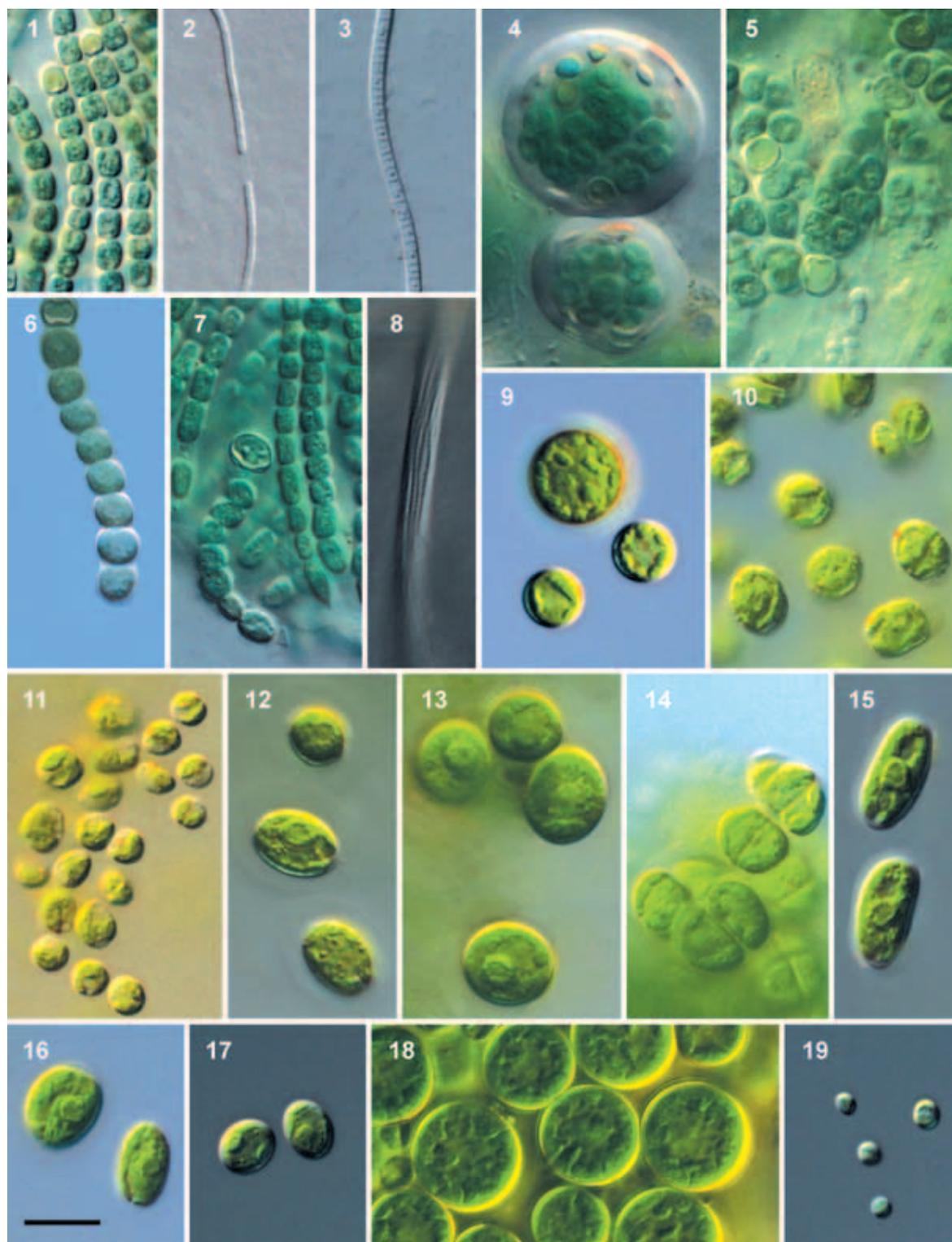
part of the archipelago [9]. Due to the extreme environmental conditions most Islands here have no forest vegetation. Southern Kurils have milder close to subtropical climate, rich floras and luxuriant vegetation.

Biological diversity of Kuril Islands in general and some groups of organisms in particular is poorly studied. Very limited data on the terrestrial algal flora of this region do not reflect the real biodiversity there [10]. In this studies algal flora of Kynashir Island near Tyatya, Golovina and Mendeleyeva volcanos were discussed. The aim of our study was investigation of biodiversity of terrestrial algae and cyanobacteria of Urup, Paramushir Iturup and Simushir Islands.

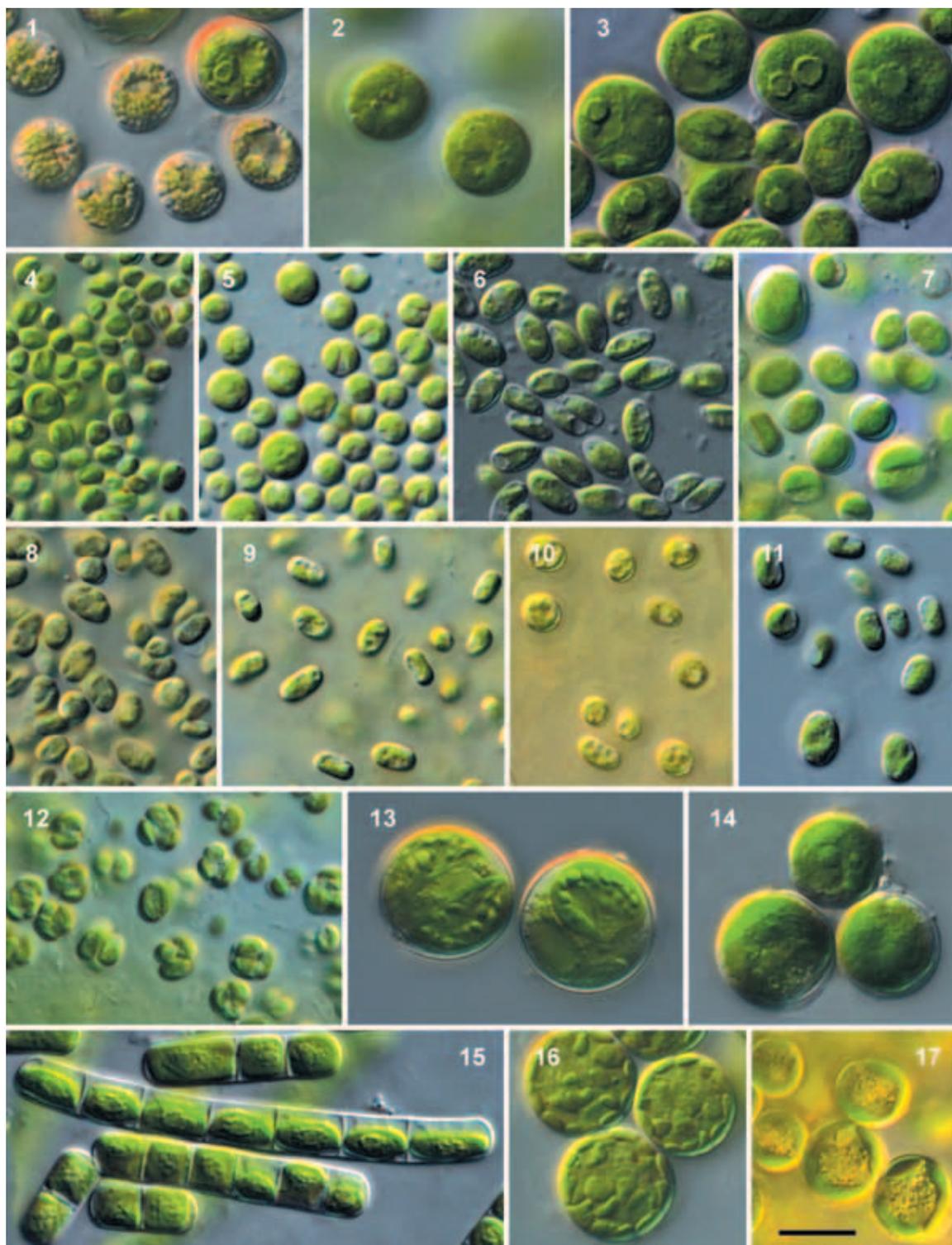
## Material and methods

Thirty four soil samples were collected in 2012–2015 on Urup (7 samples) and Simushir (8 samples) islands (Central Kurils), Paramushir island (7 samples; Northern Kurils) and Iturup (12 samples; Southern Kurils).

On Urup samples were taken from the sea terrace with maritime vegetation and Mt. Rudakova slope under the canopy [11]. The soil cover at the sampling site could be characterized as volcanic soddy-humus mid-deep soil, stratified-arenaceous texture sod soil, volcanic alluvial soil, and volcanic alluvial turf soils. The vegetation included *Rosa rugosa* Thunb., *Filipendula camtschatica* (Pall.) Maxim., *Sasa kurilensis* (Rupr.) Makino et Shibata, *Cacalia robusta* Tolm., *Trollius riederianus* Fisch. et Mey, *Artemisia montana* (Nakai) Pamp., *Artemisia un-*



**Fig. 1.** Terrestrial cyanobacteria and green algae of Urup, Paramushir, Iturup and Simushir Islands  
 1 – *Cylindrospermum* sp.; 2 – *Leptolyngbya voronichiniana*; 3 – *Leptolyngbya* cf. *valderiana*; 4 – *Nostoc minutum*;  
 5 – *Nostoc punctiforme*; 6 – *Nostoc* sp.1; 7 – *Nostoc* sp.2; 8 – cf. *Trichocoleus hospitus*; 9 – *Bracteacoccus minor*;  
 10 – *Chlamydomonas* sp.1; 11 – *Chlamydomonas* sp.2; 12 – *Chlamydomonas* sp.3; 13 – *Chlorococcum* sp.1;  
 14 – *Chlorosarcina brevispinosa*; 15 – *Cystomonas* sp.1; 16 – *Cystomonas* sp.2; 17 – *Desmodesmus abundans*;  
 18 – *Dictyococcus varians*; 19 – cf. *Mychonastes homosphaera*. Scale bar – 10  $\mu$ m.



**Fig. II.** Terrestrial green, streptophyte and ochrophyte algae of Urup, Paramushir, Iturup and Simushir Islands

1 – *Neospongiococcum* sp.; 2 – *Palmellopsis* sp.; 3 – *Spongiococcum aplanosporum*; 4 – *Chlorella vulgaris*; 5 – *Chlorella* sp.; 6 – *Coccomyxa* sp.; 7 – *Diplosphaera chodatii*; 8 – *Neocystis* sp.1; 9 – *Neocystis* sp.2; 10 – *Neocystis* sp.3; 11 – *Neocystis* sp.4; 12 – *Neocystis* sp.5; 13 – *Lobosphaera incisa*; 14 – *Parietochloris* sp.; 15 – *Klebsormidium flaccidum*; 16 – *Botrydiopsis* cf. *arhiza*; 17 – *Eustigmatos magnus*. Scale bar – 10  $\mu$ m.

*alaskensis* Rydb., *Artemisia tilesii* Ledeb., *Heracleum lanatum* Michx., *Calamagrostis langsdorffii* (Link) Trin., *Thalictrum minus* L., *Leymus mollis* (Trin.) Hara, *Sasa kurilensis* (Rupr.) Makino & Shibata, family Fabaceae, *Artemisia* sp., *Carex* sp. and *Calamagrostis* sp.

On Paramushir Island the samples were collected at the south-western part of the island, Krashennikova bay, at the foothills of Fuss Peak. Soils were of volcanic petrozem, the vegetation was composed by mosses, family Fabaceae and *Carex* sp.

On Iturup Island the samples were taken at the coasts of Dobrinia and Konservnaja bays (Chirip peninsula). In Dobrinia bay soils were volcanic lithozem and raw-organic volcanic petrozem, the vegetation was composed of *Rosa* sp. and grasses. In Konservnaja bay the soil was burozem soddy-humus and volcanic lithozem, *Alnus fruticosa* Pall. s. l., *Petasites japonicus* (Sieb. et Zucc.) Maxim., *Saxifraga* sp. and *Carex* sp.

On Simushir samples were collected from the Brouton Bay at the eastern central and western parts. At the eastern part (Vostochnaja Kleshnia Peninsula) the samples were taken from volcanic ochreous humic soil, *Filipendula camtschatica*, coastal vegetation and sedges were grown. In the center of the Brouton Bay the samples were taken from volcanic ochreous raw-organic soil, in wooded meadow dominated by *Betula* sp. and *Alnus fruticosa* Pall. s. l., *Sorbus* sp., *Salix udensis* Sekka, *Sasa kurilensis* (Rupr.) Makino et Shibata, *Calamagrostis langsdorffii* (Link) Trin., *Geranium erianthum* DC., *Maianthemum dilatatum* (Wood) A. Nelson & J.F. Macbr., *Filipendula camtschatica* (Pall.) Maxim. Samples also were taken from volcanic petrozem in *Betula ermanii* Cham. stand.

Soil samples were collected from 0–5 cm depth according to standard methods of soil phycology [12]. The samples were placed into sterile paper bags and air-dried.

In initial stages of algae and cyanobacteria cultivation Bold Basal Medium (BBM) was used [13]. Unialgal strains were isolated by the modified dilution method: 1 gram dried soil was added to 100 mL of BBM medium and grinded for 30 min by a pestle. Afterwards a few drops of the suspension were added to a Petri dish with 1.5% agar with MMB medium and distributed by the glass spatula. Initially the dishes were cultivated under 12:12 light:dark cycle at 20 °C with a photon fluence rate of 31–45 mmol · m<sup>-2</sup> · s<sup>-1</sup> for two weeks then at 10 °C for two months.

Algae colonies appearing in Petri dishes after 2 to 8 weeks of cultivation were transferred from the agar by Pasteur pipettes and grown on BBM agar slants, cyanobacterial colonies were grown on Z8 medium agar slants [14].

Soil cultures with fouling glasses were also used [15]. The soil was placed into the Petri dish with four sterile cover glasses on top. The soil was moisturized with distilled water to 80–100% of its full moisture capacity. The cover glasses were examined after 7–30 days of cultivation under the same conditions as described above.

Algae and cyanobacteria were identified using modern monographs and treatments [13–22]. The nomenclature used is in accordance with Algaebase [23].

Typical morphological features of filamentous taxa were filament, trichome, and cell dimensions, presence or absence of sheath, mucilage, cell color, heterocyte and akinete dimensions. For green algae the cells shape, the number and chloroplast shape, presence or absence of pyrenoid and mucilage were the basic features. In some cases for the purpose of correct identification the life cycles of algae were studied using methods described before [16] with original modifications. During identification of diatom algae cells shape and the numbers of striae in 10 μm were analyzed. For representatives of phyla Ochrophyta the diagnostic characters were the cell shape, the number and chloroplast shape and presence or absence of pyrenoid. Besides, the data about species ecology were considered. The strains were examined under Axio Imager A2 light microscope equipped Axio Cam MRC Digital Camera in brightfield and differential interference contrast under ×1000 magnification. Microphotographs were taken with AxioVision 4.9 program.

Patterns of algae and cyanobacteria distribution on different islands were analyzed using elements of syntaxonomic analysis according to Braun-Blanquet approach [24]. The synoptic tables were prepared using the following consistency scale: r – 0,1–5%; + – 6–10%; I – 11–20%; II – 21–40%; III – 41–60%; IV – 61–80%; V – 81–100%.

## Results and Discussion

Fifty-five species from five phyla (Cyanobacteria – 8, Chlorophyta – 29 (Chlorophyceae – 14, Trebouxiophyceae – 11), Bacillariophyta – 19, Streptophyta – 1, Ochrophyta – 2 (Xanthophyceae – 1, Eustigmatophyceae – 1)) were revealed during the study on diversity of cyano-

bacteria and algae from terrestrial habitats of Urup, Paramushir, Iturup, and Simushir (Kuril Islands) (Fig. I–II, see color insert). Algal floras of Iturup Islands were the most divers with 25 species, 23 species were found on Urup, 17 on Simushir, and 14 on Paramushir Islands. Number of species per sample decreased from Urup (3.6) to Simushir (2.1), Paramushir (2.0) and Iturup (1.9) (Table).

Distribution of terrestrial algae and cyanobacteria on the islands studied is shown in Table. A number of species were encountered on all the islands studied. These are widely distributed in terrestrial ecosystems species of Chlorophyta – cf. *Mychonastes homosphaera* (19, Fig. I), *Chlorella vulgaris* (4, Fig. II), *Dictyococcus varians* (18, Fig. I), *Bracteacoccus minor* (9, Fig. I), *Desmodesmus abundans* (17, Fig. I) [25]. It should be noted, that representatives of several taxa could be characterized by *Mychonastes homosphaera* morphotype, and their precise identification is possible only with molecular tools [26].

Cosmopolitan species *Klebsormidium flaccidum* (15, Fig. II), *Pinnularia borealis* (14, Fig. III), as well as *Diplosphaera chodatii* (7, Fig. II) were typical species of the Urup Island (Table). Although the latter species is typical lichen photobiont [27, 28], it was also recorded in biological soil crusts in desert of the south-west USA [29, 30]. Occurrence of the class Chlorophyceae representatives *Chlamydomonas* sp.1 (10, Fig. I), *Cystomonas* sp.1. (15, Fig. I) was characteristic for the Urup Island algal flora. Trebouxiophycan algae *Lobosphaera incisa* earlier recorded near Baikal Lake, was found here [16].

A large number of diatom species was isolated from soil samples collected at the waterfront of Tokotan River and on the terrace above it in alluvial volcanic soil on Urup Island (Table). Almost all these species are widely distributed in aquatic habitats. These are freshwater *Amphora ovalis*, *Navicula cryptocephala*, *Nitzschia fonticola*, *Paraplaconeis placentula*, *Planothidium lanceolatum*, *Staurosira* cf. *construens* and *Geissleria* sp. [31–37]. *Amphora commutata* and *Navicula veneta* are more typical for brackish waters [38, 39], while *Navicula cryptocephala* occurs in both freshwater and marine habitats [37]. *Anorthoneis* sp. are mostly marine taxa [40]. *Placoneis* cf. *porifera*, was recorded in the paddy fields in Japan [41].

It is necessary to note, that most of the species, listed above often recorded in terrestrial ecosystems also. *Amphora ovalis*, *Navicula veneta*, *Nitzschia fonticola*, *Anorthoneis pediculus* (as *Cocconeis pediculus*), *Anorthoneis placentula*

(as *Cocconeis placentula*), *Caloneis bacillum*, *Staurosira construens* var. *triundulata* (as *Fragilaria construens* var. *triundulata*), *Staurosira construens* var. *binodis* (as *Fragilaria construens* var. *binodis*) were found in terrestrial ecosystems in Europe and USA, including Surtsey island [19]. Surtsey island was formed in 1963 after volcano eruption [3]. These algae could be attributed to amphibian algae, which live in both aquatic and terrestrial habitats [42].

Sea coasts are the most dynamic form of the coastal zone. Due to highly specific tidal processes taking place at the coastal zone, the latter should be regarded as a boundary between terrestrial and shallow constituents [43]. Distribution of diatom coastal flora of Urup Island is similar to that of Mediterranean sandy beaches [44]. Typical marine diatom community is changes the structure first (splash zone), then transitional complex with a mixture of marine and terrestrial species is formed (5, 10, 15 m from the waterfront), and finally a complex of terrestrial species with a seldom occurrence of marine species is shaped (100–200 m from the waterfront).

Typical terrestrial algae *Palmellopsis* sp. (2, Fig. II), was found on Paramushir, Iturup and Simushir islands (Table 1). *Parietochloris* sp. (14, Fig. II), and *Eustigmatos magnus* (17, Fig. II), were recorded in algal flora of Paramushir and Simushir.

In soils of Paramushir Island representatives of the genus *Neocystis* (9, Fig. II), *Chlorella* (5, Fig. II), *Nostoc punctiforme* (5, Fig. I), *Spongiococcum aplanosporum* (3, Fig. II), and *Luticola mutica*, were found (Table). *Spongiococcum aplanosporum* was identified in samples from Paramushir Island only after study of the life cycle of the strains. This species is characterized by large (up to 30 µm) cells with large nucleus, ellipsoid zoospores with parietal chloroplast, central pyrenoid and anterior nucleus [16].

*Leptolyngbya voronichiniana* (2, Fig. I), known for its wide distribution in terrestrial ecosystems [45], was a diagnostic species for the Iturup Island. Beside that *Cylindrospermum* sp. (1, Fig. I), and *Nostoc* sp. (6, Fig. I), green algae from the genera *Chlamydomonas* (11, Fig. I), *Chlorococcum* (13, Fig. I), *Cystomonas* sp. 2 (16, Fig. I), *Neocystis* sp.4, *Neocystis* sp. 5 (11, 12, Fig. II), yellow-green algae *Botrydiopsis* cf. *arhiza* (12, Fig. II), were found here (Table). Diatoms were represented by the ubiquitous aquatic species *Caloneis bacillum*, as well as *Nitzschia palea*, and *Pinnularia microstauron*, which could be found in freshwater and terrestrial ecosystems [19, 37].

Table  
Spatial-ecological patterns of terrestrial algae and cyanobacteria at the Urup, Paramushir, Iturup and Simushir Islands (by [24])

Taxon	Island	Urup	Paramushir	Iturup	Simushir
Number of species		25	14	23	17
<b>Number of samples</b>		7	7	12	8
Number of species per sample		3,6	2,0	1,9	2,1
cf. <i>Mychonastes homosphaera</i> Skuja		IV	IV	IV	IV
<i>Chlorella vulgaris</i> Beijerinck		I	I	II	III
<i>Dictyococcus varians</i> Gerneck		II	I	I	I
<i>Bracteacoccus minor</i> (Schmidle ex Chodat) Petrová		II	I	+	II
<i>Desmodesmus abundans</i> (Kirchner) E.H.Hegewald		I	I	+	II
<i>Klebsormidium flaccidum</i> (Kützing) P.C.Silva, K.R.Mattox & W.H.Blackwell		III			
<i>Diplosphaera chodatii</i> Bialosukniá		II			
<i>Navicula cryptocephala</i> Ehrenberg		II			
<i>Pinnularia borealis</i> Ehrenberg		II		I	
<i>Chlamydomonas</i> sp.1		I			
<i>Cystomonas</i> sp.1		I			
<i>Lobosphaera incisa</i> (Reisigl) Karsten, Friedl, Schumann, Hoyer et Lembecke		I			
<i>Amphora commutata</i> Grunow in Van Heurck		I			
<i>Amphora ovalis</i> (Kützing) Kützing		I			
<i>Anorthoneis</i> sp.		I			
<i>Geissleria</i> sp.		I			
<i>Navicula veneta</i> Kützing		I			
<i>Nitzschia fonticola</i> (Grunow) Grunow in Van Heurck		I			
<i>Paraplaconeis placentula</i> (Ehrenberg) M.S.Kulikovskiy & Lange-Bertalot		I			
<i>Placoneis</i> cf. <i>porifera</i> (Hustedt) T.Ohtsuka & Y.Fujita		I			
<i>Planothidium lanceolatum</i> (Brébisson ex Kützing) Lange-Bertalot		I			
<i>Staurosira</i> cf. <i>construens</i> Ehrenberg		I			
<i>Palmellopsis</i> sp.			I	I	II
<i>Parietochloris</i> sp.			I		II
<i>Eustigmatis magnus</i> (J.B.Peretsen) Hibberd			II		+
<i>Neocystis</i> sp.2			II		

Taxon	Island	Urup	Paramushir	Iturup	Simushir
<i>Chlorella</i> sp.1			I		
<i>Neocystis</i> sp.1			I		
<i>Nostoc punctiforme</i> Kützing (Hariot)			I		
<i>Sporogococcum aplanosporum</i> (Arce & Bold) Shin Watanabe & L.A.Lewis			I		
<i>Luticola mutica</i> (Kützing) D.G.Mann in Round, R.M.Crawford & D.G.Mann			I		
<i>Leptolyngbya voronichiniana</i> Anagnostidis & Komárek				III	
<i>Chlorosarcina brevispinosa</i> S.Chantanachai & Bold				I	
<i>Cylindrospermum</i> sp.				+	
<i>Nostoc</i> sp.1				+	
<i>Chlamydomonas</i> sp.2				+	
<i>Chlorococcum</i> sp.1				+	
<i>Cystomonas</i> sp.2				+	
<i>Neocystis</i> sp.3				+	
<i>Neocystis</i> sp.4				+	
<i>Caloneis bacillum</i> (Grunow) Cleve				+	
<i>Nitzschia palea</i> (Kützing) W.Smith				+	
<i>Pinnularia microstauron</i> (Ehrenberg) Cleve				+	
<i>Botrydiopsis</i> cf. <i>arhiza</i> Borzi				+	
cf. <i>Trichocoleus hospitus</i> (Hansgirg ex Gomont) Anagnostidis				II	I
<i>Nostoc minutum</i> Desmazières ex Bornet & Flahault				+	I
<i>Coccomyxa</i> sp.					II
<i>Neosporogococcum</i> sp.					II
<i>Leptolyngbya</i> cf. <i>valderiana</i> (Gomont) Anagnostidis & Komarek					I
<i>Nostoc</i> sp.2					I
<i>Chlamydomonas</i> sp.3					I
<i>Neocystis</i> sp.5					I
<i>Hantzschia amphioxys</i> (Ehrenberg) Grunow in Cleve & Grunow		I		+	
<i>Humidophila contenta</i> (Grunow) Lowe, Kociolek, J.R.Johansen, Van de Vijver, Lange-Bertalot & Kopalová		I			I
<i>Pinnularia subcapitata</i> W.Gregory		I			I

Note: The synoptic tables were prepared using the following consistency scale: r – 0,1–5%; + – 6–10%; I – 11–20%; II – 21–40%; III – 41–60%; IV – 61–80%; V – 81–100%. Groups of species characteristic for the studied territories are highlighted in gray.

Cyanobacteria cf. *Trichocoleus hospitus* (8, Fig. I), and *Nostoc minutum* (4, Fig. I), characterized by nearly cosmopolitan distribution in terrestrial ecosystems [22, 45], was found on Iturup and Simushir Islands (Table).

Representatives of the genera *Coccomyxa* (6, Fig. II), and *Neospongiococcum* (1, Fig. II), were the most frequently accounted on the latter island (Table). *Leptolyngbya* cf. *valderiana* (3, Fig. I), *Chlamydomonas* sp. 3. (12, Fig. I), and *Neocystis* sp.5 (12, Fig. II), were also revealed on Simushir Island.

Ubiquitous diatoms *Hantzschia amphioxys*, *Humidophila contenta*, and *Pinnularia subcapitata* were also recorded in studied (Table). *Humidophila* members earlier have been recorded from volcanic zones (e.g. Hawaii) [46].

It should be noted that many from the species found, e.g. *Bracteacoccus minor*, *Klebsormidium flaccidum*, *Pinnularia borealis*, members of the genera *Leptolyngbya*, *Chlorella*, *Neocystis*, *Parietochloris* have been recorded during the studies on biodiversity of terrestrial algae and cyanobacteria of Kuril-Kamchatka volcanic belt [10].

To our knowledge, we present the first information on diversity and community structure of terrestrial algae and cyanobacteria of some Kuril Islands.

### Conclusion

The most notable feature of algal and cyanobacterial terrestrial communities at the Urup, Paramushir, Iturup and Simushir Islands are prevalence of cosmopolitan species tolerant to toxic volcanic substrates. Besides, studied area characterized by high diversity of amphibian diatom algae.

It is necessary to note, that this results should be considered as preliminary. For understanding biodiversity of terrestrial algae and cyanobacteria of Kuril Islands further molecular-genetic research are necessary.

*This study was supported by the Russian Foundation for Basic Research in frame of projects 16-04-01511 a and 15-29-05893 ofr-i. We are thankful to Yunir Gabidullin for helping us in preparation of the figure plates, and Dr. Natalya Sukhanova for valuable discussions.*

### References

1. Furnes H., Banerjee N.R., Muehlenbachs K., Staudigel H., de Wit M. Early life recorded in archean pillow lavas // Science. 2004. V. 304. No. 5670. P. 578–581.

2. Dingwell D.B., Lavallée Y., Kueppers U. Volcanic ash: a primary agent in the Earth system // Physics and Chemistry of the Earth. 2012. V. 45–46. P. 2–4. doi:10.1016/j.pce.2011.07.007

3. Schwabe G.H. On the algal settlement in craters on Surtsey during summer 1968 // Surtsey Research Program Report. 1970. V. 5. P. 51–55.

4. Schwabe G.H. Nitrogen fixing blue-green algae as pioneer plants on Surtsey 1968-1973 // Surtsey Research Program Report. 1974. V. 7. P. 22–25.

5. Schwabe G.H., Behre K. Ökogenese der Insel Surtsey 1968–1970 // Natur Rdsch. 1971. V. 24. P. 513–519.

6. Henriksson E. Algal nitrogen fixation in temperate regions // Plant and Soil. 1971. Special volume. P. 415–419.

7. Brock T.D. Primary colonization of Surtsey, with special reference to the blue-green algae // Oikos. 1973. V. 24. P. 239–243.

8. Kotlyakov V.M. Atlas of the Kuril Islands. Moskva-Vladivostok: DIK, 2009. 515 p. (in Russian).

9. Grishin S.Yu. Geography of vegetation cover of Kuril Islands (for map of vegetation of archipelago) // Izvestiya Russkogo geograficheskogo obshchestva. 2008. V. 140. No. 5. P. 8–15. (in Russian)

10. Shtina E.A., Andreyeva V.M., Kuzyakina T.I. Algae settlement of volcanic substrates // Botanicheskiy zhurnal. 1992. No. 8. P. 33–42.

11. Polokhin O.V. Morphological features and acid-basic properties of the soil of the central part of the island of Urup (The Kurilsk archipelag) // Scientific reviews. Biological sciences. 2017. No. 5. P. 18–22. (in Russian)

12. Gollerbach M.M., Shtina E.A. Soil algae. Leningrad, Rossiya, Nauka, 1969. 228 p. (in Russian)

13. Bischoff H.W., Bold H.C. Phycological studies. IV. Some soil algae from Enchanted Rock and related algal species. University of Texas Publications 6318, Austin, 1963. 95 p.

14. Carmichael W.W. Isolation, culture, and toxicity testing of toxic freshwater cyanobacteria (blue-green algae). In: Shilov, V. (Ed.) Fundamental research in homogenous catalysis 3. Gordon & Breach, New York, 1986. P. 1249–1262.

15. Lund J.W.G. Observations on soil algae. I. The ecology, size and taxonomy of British soil diatoms // New Phytologist. 1945. V. 44. No. 2. P. 169–216.

16. Andreyeva V.M. Terrestrial and aerophilic green algae – Chlorophyta: Tetrasporales, Chlorococcales, Chlorosarcinales. Sankt-Peterburg: Nauka, 1998. 351 p. (in Russian)

17. Ettl H. Xanthophyceae 1. Süßwasserflora von Mitteleuropa, 3 / Edited by H. Ettl, J. Gerloff, H. Heying. Stuttgart-New York: Gustav Fischer Verlag, 1978. 530 p.

18. Ettl H., Gärtner G. Chlorophyta II. Tetrasporales, Chlorococcales, Gloeodendrales / Edited by H. Ettl, J. Gerloff, H. Heynig, D. Mollenhauer Süßwasserflora von Mitteleuropa, 10. G. Fischer, Stuttgart, 1988. 436 p.

19. Ettl H., Gärtner G. Syllabus der Boden-, Luft- und Flechtenalgen. Gustav Fischer Verlag, Stuttgart. 1995. 724 p.

20. Krammer K., Lange-Bertalot H. Bacillariophyceae, Naviculaceae. Süßwasserflora von Mitteleuropa. Band 2/4. Berlin, Spectrum Academiche Verlag, 1986. 876 p.
21. Komárek J., Anagnostidis K. Cyanoprokaryota. 2. Teil: Oscillatoriales / Süßwasserflora von Mitteleuropa. Bd. 19/2. Jena; Stuttgart; Lübeck. Ulm, 2005. 759 p.
22. Komárek J. Cyanoprokaryota. 3. Heterocytous genera. In: Büdel B., Gärtner G., Krienitz L., Schagerl M. (eds), Süßwasserflora von Mitteleuropa – Freshwater flora of Central Europe. Berlin, Heidelberg, Springer Verlag, 2013. 1130 p.
23. Guiry M.D., Guiry G.M. Algae Base. World-wide electronic publication, National University of Ireland, Galway. 2018. <http://www.algaebase.org>.
24. Mirkin B.M., Naumova L.G., Solomets A.I. Modern Science of Vegetation. Moskva: Logos, 2000. 263 p. (in Russian)
25. Kostikov I.J., Romanenko P.O., Demchenko E.M., Darienko T.M., Mikhayljuk T.I., Rybchinskiy O.V., Solonenko A.M. Soil algae of Ukraine. Kiev, Phytosotsiologichniy center, 2001. 300 p. (in Ukrainian)
26. Krienitz L., Bock C., Dadheech P.K., Pröschold T. Taxonomic reassessment of the genus *Mychonastes* (Chlorophyceae, Chlorophyta) including the description of eight new species // *Phycologia*. 2011. No. 50. P. 89–106.
27. Voytsekhovich A., Dymytrova L., Nadyeina O. Photobiont composition of some taxa of the genera *Micarea* and *Placynthiella* (Lecanoromycetes, lichenized Ascomycota) from Ukraine // *Folia Cryptogamica Estonica*. 2011. No. 48. P. 135–148.
28. Fontaine K.M., Booth T., Deduke C., Piercey-Normore M.D. Notes on the species assemblage of the lichen *Dermatocarpon luridum* in Northwestern Manitoba, Canada // *Evansia*. 2014. V. 31. No. 2. P. 69–74.
29. Flechtner V.R. Enigmatic desert soil algae. In J. Seckbach (Ed.). Enigmatic microorganisms and life in extreme environments. Kluwer Academic Publishers, Amsterdam, 1999. P. 231–241.
30. Flechtner V.R. North American microbiotic soil crust communities: diversity despite challenge. In J. Seckbach (Ed.). Algae and cyanobacteria in extreme environments. Dordrecht, The Netherlands: Springer, 2007. P. 539–551.
31. Lee K., Round F.E. Studies on freshwater Amphora species. I. *Amphora ovalis* // *Diatom Research*. 1987. No. 2. P. 193–203.
32. Round F.E., Bukhtiyarova L. Epipsammic diatoms–communities of British rivers // *Diatom Research*. 1996. No. 11. P. 363–372.
33. Lange-Bertalot H. *Navicula sensu stricto*. 10 Genera separated from *Navicula sensu lato*. Frustulia. Diatoms of Europe: diatoms of the European inland waters and comparable habitats. 2001. V. 2. P. 1–526.
34. Aboal M., Alvarez Cobelas M., Cambra J., Ector L. Floristic list of non-marine diatoms (Bacillariophyceae) of Iberian Peninsula, Balearic Islands and Canary Islands. Updated taxonomy and bibliography // *Diatom Monographs*. 2003. No. 4. P. 1–639.
35. Kulikovskiy M.S., Lange-Bertalot H., Metzeltin D., Witkowski A. Lake Baikal: Hotspot of endemic diatoms I. // *Iconographia Diatomologica*. 2012. No. 23. P. 1–607.
36. John J. Diatoms from Stradbroke and Fraser Islands, Australia: taxonomy and biogeography *The Diatom Flora of Australia*. V. 1. Oberreifenberg: Koeltz Botanical Books, 2016. 377 p.
37. Cantonati M., Kelly M.G., Lange-Bertalot H. Freshwater benthic diatoms of Central Europe: over 800 common species used in ecological assessments. English edition with updated taxonomy and added species. Schmittgen-Oberreifenberg: Koeltz Botanical Books, 2017. 942 p.
38. Hofmann G., Werum M., Lange-Bertalot H. Diatomeen im Süßwasser—Benthos von Mitteleuropa. Bestimmungsfloren Kieselalgen für die ökologische Praxis. Über 700 der häufigsten Arten und ihre Ökologie. Königstein: Koeltz Scientific Books, 2013. P. 908.
39. Miscoe L.H., Johansen J.R., Kociolek J.P., Lowe R.L. The diatom flora and cyanobacteria from caves on Kauai, Hawaii. I. Investigation of the cave diatom flora of Kanuai, Hawaii: an emphasis on taxonomy and distribution // *Bibliotheca Phycologica*. 2016. No. 123. P. 3–74.
40. Sims P.A. An atlas of British diatoms arranged by B. Hartley based on illustrations by H.G. Barber and J.R. Carter Bristol: Biopress Ltd., 1996. P. 601.
41. Ohtsuka T., Fujita Y. The diatom flora and its seasonal changes in a paddy field in central Japan // *Nova Hedwigia*. 2001. V. 73. No. 1–2. P. 97–128.
42. Aleksahina T.I., Shtina E.A. Terrestrial algae of forest biogeocoenoses. Moskva: Nauka, 1984. 147 p. (in Russian)
43. Nikonova S.E. Microphytobenthos supralitorals of sandy beaches of the Odessa Gulf (Ukraine) // Aktual'nyye problemy sovremennoy al'gologii: Tezisy dokladov IV Mezhdunarodnoy konferentsii. Kiyev, 23–25 maya 2012. *Algologiya*. Spetsvypusk. P. 210–211. (in Russian)
44. Fazlutdinova A.I., Sukhanova N.V. Diatoms of sandy beaches of some Mediterranean seas // *Algologiya*. 2014. V. 24. No. 3. P. 384–387. (in Russian)
45. Gaysina L.A., Bohunická M., Hazuková V., Johansen J.R. Biodiversity of terrestrial cyanobacteria of the South Ural region // *Cryptogamie Algologie*. 2018. V. 39. No. 2. P. 1–32. doi.org/10.7872/crya/v39.iss2.2018.167
46. Lowe R.L., Kociolek P., Johansen J.R., Van De Vijver, B., Lange-Bertalot H., Kopalová K. *Humidophila* gen. nov., a new genus for a group of diatoms (Bacillariophyta) formerly within the genus *Diadismis*: species from Hawai'i, including one new species // *Diatom Research*. 2014. V. 29. P. 351–360.

## Возможность частичной замены антибиотиков биологически активными веществами при лечении клинических маститов у коров

© 2018. М. А. Азиямов, к. в. н., в. н. с.,

Федеральный аграрный научный центр Северо-Востока  
имени Н.В. Рудницкого,  
610007, Россия, г. Киров, ул. Ленина, 166а,  
e-mail: lazermikl@yandex.ru

По информации Всемирной организации здравоохранения (ВОЗ) возрастает проблема антибиотикорезистентных штаммов золотистого стафилококка *Staphylococcus aureus*. Эти бактерии меняют свой геномный состав под воздействием антибиотиков и быстро распространяются в окружающей среде, создавая угрозу для здоровья человечества и продовольственной безопасности ряда стран. ВОЗ требует уменьшить употребление антибиотиков при маститах у коров на 50%. Золотистый стафилококк – преобладающий вид возбудителя маститов коров в странах Западной Европы и России. Почти в 90% больших ферм и комплексов, где используют антибиотики, регистрируется стафилококковый мастит, вызванный полирезистентными штаммами *S. aureus*.

Проведена оценка возможности частичной замены антибиотиков на биологически активные вещества при лечении клинических маститов у коров. Установлено, что Интерферон бычий рекомбинантный, полисахарид гриба *Hericium erinaceus* (ПС *H. erinaceus*) и Диальдерон через 10 дней лечения клинических маститов у коров повышали количество выздоровевших соответственно на 30, 20 и 20%, по сравнению с антибиотикотерапией. Биологически активные вещества нормализовали количество соматических клеток в молоке до физиологического уровня. Изученные вещества снижали уровень интерлейкина-2 (И-2) и интерлейкина-8 (И-8), простагландинов Е2, нормализовали скорость оседания эритроцитов (СОЭ) и фагоцитарную активность в крови экспериментальных животных. Количество соматических клеток в молоке коров подопытных групп после 10 дней лечения уменьшилось до физиологической нормы. Молоко после лечения коров было годно к пищевому употреблению на 72 часа раньше, чем при антибиотикотерапии.

**Ключевые слова:** антибиотикотерапия, Диальдерон, Интерферон рекомбинантный, клинические маститы, полисахарид гриба *Hericium erinaceus*.

## The partial replacement of antibiotics with biologically active substances at treatment of cows' mastitis

© 2018. М. А. Aziamov ORCID: 0000-0001-5718-9463,

Federal Agricultural Research Center of North-East named N.V. Rudnitsky,  
166a, Lenin St., Kirov, Russia, 610007,  
e-mail: lazermikl@yandex.ru

The World Health Organization (WHO) is informing about the antibiotic resistant strains of *Staphylococcus aureus* increasing problem. These bacteria are changing their genomic composition under the influence of antibiotics and are rapidly spreading in the environment, threatening human health and food security in a number of countries. WHO requires reducing the use of antibiotics in cows' mastitis by 50%. *Staphylococcus aureus* is the prevailing kind of cows' mastitis pathogen in Western Europe and Russia. The staphylococcal mastitis caused by multiresistant strains of *Staphylococcus aureus* is registered in almost 90% of large farms and complexes where antibiotics are used.

The possibility of partial replacement of antibiotics with biologically active substances at treatment of clinical mastitis in cows was evaluated. It is established that Interferon bovine recombinant, Polysaccharide of *Hericium erinaceus* fungus (PS of *H. erinaceus*) and Dialderon after 10 days of treatment of clinical mastitis in cows increased the amount of cured individuals, respectively, by 30, 20 and 20% in comparison with antibiotic therapy. Biologically active substances normalized the number of somatic cells in milk to physiological level. The studied substances reduced the levels of interleukin-2 (И-2) and interleukin-8 (И-8), prostaglandins E2, normalized erythrocyte sedimentation rate (ESR) and phagocytic activity in the blood of experimental animals. The somatic cells number in the milk of experimental groups cows are decreased to physiological norm after 10 days of treatment. Milk after treatment of cows was fit for food consumption 72 hours earlier than with antibiotic therapy.

**Keyword:** antibiotic therapy, Dialderon, Interferon recombinant, clinical mastitis, Polysaccharid of *Hericium erinaceus* fungus.

Основными показателями экологичности и качества коровьего молока являются уровень бактериальной контаминации, количество соматических клеток и отсутствие ингибиторов (антибиотиков, гормонов, дезинфектантов и других химических веществ) [1]. Натуральный и безопасный для потребителя продукт можно получить только от здоровой коровы [2]. В связи с этим серьёзную проблему для животноводства и ветеринарной службы создают маститы у коров. Большинство клинических маститов вызывается, в основном, кокковой микрофлорой, в частности *Staphylococcus aureus* в ассоциации с другими видами бактерий и грибов [3].

По информации Всемирной организации здравоохранения (ВОЗ) возрастает проблема антибиотикорезистентных штаммов золотистого стафилококка *S. aureus*. Эти бактерии меняют свой геномный состав под воздействием антибиотиков и быстро распространяются в окружающей среде, создавая угрозу для здоровья человечества и продовольственной безопасности ряда стран [4]. ВОЗ требует уменьшить употребление антибиотиков при маститах у коров на 50%. Золотистый стафилококк – преобладающий вид возбудителя маститов коров в странах Западной Европы и России. Почти в 90% больших ферм и комплексов, где используют антибиотики, регистрируется стафилококковый мастит, вызванный полирезистентными штаммами *S. aureus* [5]. Установлена тесная экологическая связь полирезистентных штаммов *S. aureus* с объектами медицинских стационаров и животноводческих ферм [6]. У рабочих промышленных животноводческих ферм наблюдается носительство полирезистентных штаммов *S. aureus*, полученных от коров, что подтверждается идентичными генетическими маркерами штаммов, выделенных от людей и животных [7].

При лечении маститов широко используются антибактериальные, гормональные и противовоспалительные препараты, которые вводятся как интрацистернально (в сосок вымени), так и парентерально (внутримышечно, подкожно). После активной антибиотикотерапии различные антибактериальные вещества сохраняются в молоке в среднем 48–192 часов после последнего введения. При обнаружении антибиотиков (ингибиторов) в молоке, перерабатывающие предприятия его не принимают [8]. При маститах также резко увеличивается количество соматических клеток в молоке, что ведёт к отказу от приёма продукта или снижению его сорта [9].

Целью нашей работы являлось изучение и обоснование возможности частичной замены антибиотиков некоторыми биологическими веществами при лечении коров от клинических маститов для минимизации сроков выздоровления животных и получения более экологичного продукта.

## Материалы и методы

Исследования проводились на коровах чёрно-пёстрой породы, скрещенных с коровами голштино-фризской породы, в возрасте от 2 до 4 лет. Животные были разделены на пять групп: две – контрольные и три – подопытные. В каждую группу входило по 10 животных. Первую контрольную группу составляли здоровые коровы, дающие молоко с физиологическим количеством соматических клеток. Во вторую контрольную и три подопытные группы входили животные, больные клиническим гнойно-катаральным маститом стафилококковой этиологии. Животных второй контрольной группы лечили общепринятым методом, с применением антибиотиков. Интрацистернально один раз в сутки вводили суспензию Tetra-Delta (Pfizer, США). Препарат вводили пять раз за десять дней с интервалом 24 ч. В состав препарата входят антибиотики новобиоцин натрия 0,1 г, неомицина сульфат 0,15 г, дигидрострептомицина сульфат 0,125 г, бензилпенициллина новокаиновая соль 100 тыс. ед и гормон преднизолон 0,01 г. Запрет на употребление молока после курса Tetra-Delta в пищевых целях составляет 72 ч после окончания лечения. Кроме того всем животным второй контрольной группы вводили подкожно, в дозе 1 мл на 50 кг массы, один раз в день, в течение 5 сут антибиотик Цефтонит (Нита-Фарм, Россия). Цефтонит содержит 5% цефтиофура гидрохлорида и разрешён для применения у лактирующих коров. С учётом фармакинетики цефтонита, он практически не проникает в молоко и через 24 ч после применения не определяется как ингибитор.

Во всех подопытных группах интрацистернальный антибиотик Tetra-Delta не использовали. Первая подопытная группа больных маститом коров подвергалась лечению Интерфероном бычьим рекомбинантным (БелАгроГен, Беларусь) в дозе 1,0 см<sup>3</sup> на 10 кг массы, один раз в сутки, в течении пяти сут, с интервалом в 24 ч. Интерферон бычий рекомбинантный содержал 10 тыс. ед. интерферона на 1,0 см<sup>3</sup>. Коровам этой группы также вводили Цефтонит подкожно, по инструкции в течение

5 суток. Для лизиса микроорганизмов, продуктов распада тканей и снижения болезненности в сосок вводили ферментативно-витаминный препарат Мастизим (БелЭкоТехника, Беларусь) один раз в сутки в течение 7 дней. После лечения коров Интерфероном бычьим рекомбинантным и Мастизимом молоко можно использовать без ограничений.

Для лечения больных маститом коров второй подопытной группы использовали лиофилизированную фракцию № 5 полисахарида гриба *Hericium erinaceus* БП 16 (ПС *H. erinaceus*), полученную в лаборатории биотехнологии растений и микроорганизмов ФГБНУ ФАНЦ Северо-Востока из искусственно выращенных и высушенных плодовых тел путём экстракции 5%-го раствора NaOH, согласно протоколу, описанному в работе [10]. ПС *H. erinaceus* использовали в виде стерильного раствора (500 мг субстанции полисахарида на 1000 мл физиологического раствора) после мембранной фильтрации. ПС *H. erinaceus* вводили интрацистернально по 5 мл 1 раз в сутки в течение 7 дней и дополнительно подкожно по 8 мл, 1 раз в сутки в течение 7 дней. Кроме раствора ПС *H. erinaceus* коровам подкожно вводили антибиотик Цефтонит в дозе 1 мл на 50 кг массы, один раз в сутки в течение 5 суток.

Коров третьей подопытной группы лечили новым иммунокорректирующим [11] противовоспалительным препаратом [12] Диальдерон (декагидроксипролина-2-деценногидроизохинолина диметиламиноэтанола альбуминатом), полученным из природных веществ. Диальдерон синтезировали из изохинолинового гликозида растения Солянки Рихтера, декагидроокси-2-деценовой кислоты маточного молочка пчёл, диметиламинаэтанола из молока лососевых рыб, растительной аминокислоты пролина и сывороточного альбумина крупного рогатого скота. Препарат вводили в виде раствора (100 мг на 1 мл) в дозе 5 мл – интрацистернально, один раз в сутки в течение 7 суток. Кроме Диальдерона коровам вводили подкожно антибиотик Цефтонит, согласно инструкции, в течение 5 суток.

Количество соматических клеток определяли микроскопическим методом с подсчётом окрашенных клеток [13] и на вискозиметрическом анализаторе молока Соматос мини (Россия). Выделенные из молока культуры микроорганизмов типировали на селективных и биохимических средах «Cusabio Biotech Co» (Китай). LD<sub>50</sub> *S. aureus* для белых беспородных мышей определяли общепринятым методом [14].

Количество лейкоцитов, иммуноглобулинов G (IgG), скорость оседания эритроцитов (СОЭ) и фагоцитарную активность определяли в соответствии с утвержденными методиками [15].

Количество оксида азота в крови определяли скрининг-методом [16].

Уровень интерлейкина-2 (И-2) и интерлейкина-8 (И-8) определяли методом иммуноферментного анализа диагностикумами «Cusabio Biotech Co» (Китай) на иммуноферментном анализаторе Zenyth 340 (Anthos).

Липоксигеназу и количество простагландинов E2 в крови коров определяли методом иммуноферментного анализа (ИФА) диагностикумами «Cusabio Biotech Co» (Китай).

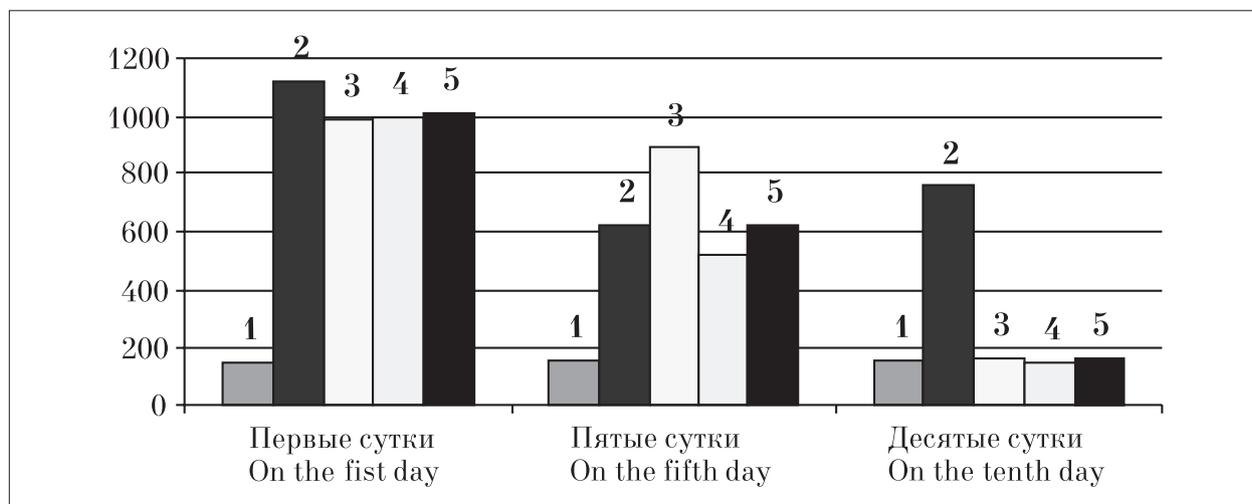
Статистическую обработку данных проводили по программе «Statistica 5,0» [17].

### Результаты и их обсуждение

У коров второй контрольной группы и всех трёх подопытных групп диагностировали гнойно-катаральный мастит. У животных наблюдались угнетение, снижение аппетита, повышение температуры до 41,5 °С. У большинства коров отмечали воспаление тканей одной четверти вымени, хотя у нескольких животных было поражение двух четвертей. Поражённая четверть становилась отёчной и болезненной. Сосок был болезненный, проходимость канала резко снижалась. При пальпации в цистерне и у основания соска обнаруживались уплотнённые, горячие на ощупь участки. Надвыменные лимфоузлы со стороны поражённой четверти были болезненны, увеличены. При сдаивании секрета сероватого цвета в нём были видны сгустки казеина и серо-жёлтого гноя.

Из всех проб молока от больных коров второй контрольной и всех подопытных групп на селективной среде «CHRO Magar» выделили культуру *S. aureus*. Колонии были окрашены в розово-лиловый цвет. Типизация вида подтверждалась культурально-морфологическими и биохимическими свойствами. Культура была патогенной для белых мышей (LD<sub>50</sub> 22,65×10<sup>6</sup> микробных клеток). Также в ассоциации с *S. aureus* выделялись непатогенные для белых мышей культуры *Staphylococcus agalactiae* и *Lactococcus lactis*.

Количество соматических клеток в молоке от больных коров было резко увеличено по сравнению с физиологической нормой от 154,2±8,4 (первая контрольная группа) до 1121,5±9,1 тыс./см<sup>3</sup> (рис.). В составе со-



**Рис.** Количество соматических клеток в молоке экспериментальных коров (тыс./см<sup>3</sup>): 1 – 1-я контрольная группа (здоровые коровы), 2 – 2-я контрольная группа (больные коровы, лечение антибиотиками), 3 – 1-я подопытная группа (больные коровы, Интерферон рекомбинантный + Цефтонит), 4 – 2-я подопытная группа (больные коровы, ПС *H. erinaceus* + Цефтонит, 5 – 3-я подопытная группа (больные коровы, Диальдерон + Цефтонит).  
**Fig.** Somatic cells quantity in milk of experimental cows (thous./cm<sup>3</sup>): 1 – 1st control group (healthy cows), 2 – 2nd control group (sick cows, antibiotic treatment), 3 – 1st experimental group (sick cows, Interferon recombinant + Ceftonite), 4 – 2nd experimental group (sick cows, PS *H. erinaceus* + Ceftonite), 5 – 3rd experimental group (sick cows, Dialderon + Ceftonite).

матических клеток, кроме эпителиальных и эндотелиальных, до 38,50±0,25% составляли лейкоциты, лимфоциты, макрофаги альвеол вымени, гистиоциты и эозинофилы.

Количество соматических клеток в молоке, некоторые показатели иммунитета в крови и наличие контаминации молока экспериментальных животных *S. aureus* определялись на первый, пятый и десятый дни лечения.

Коровы считались здоровыми, если у них отсутствовали клинические симптомы мастита (включая хронический), число соматических клеток снижалось до нормы (ниже 500 тыс./см<sup>3</sup>) и из молока не выделяли культуры *S. aureus*. На первые сутки лечения у животных второй контрольной группы и всех подопытных групп, по сравнению со здоровыми коровами первой контрольной группы, были повышены количество лейкоцитов в крови более, чем в 2 раза; уровень IgG, СОЭ – более, чем в 2,5 раза; оксид азота – в 5,6 раз (табл.). Наличие острого воспалительного процесса у коров, больных маститами, подтверждалось высокими показателями медиаторов воспаления в сыворотке крови: липоксигеназой и простагландинами E2, по сравнению с показателями у первой контрольной группы. Также в крови у больных животных значительно повышался уровень П-8, отвечающий за усиление хематоксиса лейкоцитов, что подтверждалось увеличением числа лейкоцитов в крови и молоке. Высоким

был показатель П-2, контролирующей пролиферацию Т-хелперов, фагоцитарную и цитолитическую активность, что подтверждалось показателями высокой фагоцитарной активности под действием антигенных комплексов *S. aureus* (табл.).

Через пять суток лечения коров во второй контрольной и во всех подопытных группах состояние животных заметно улучшилось. Температура снизилась до 39 °С, восстановился аппетит и физиологическая активность. Поражённые доли вымени стали более мягкими, исчезли уплотнения надвыменных лимфоузлов.

Все применяемые препараты и биологически активные вещества не вызывали у коров аллергизирующего действия и других побочных явлений (одышки, нарушения мочеиспускания, судорог и др.).

Из проб молока у коров второй контрольной группы патогенный *S. aureus* выделялся у трёх животных (30%). В каждой из подопытных групп *S. aureus* выделялся у 10% животных на каждую группу (табл.).

Антибиотикотерапия коров (вторая контрольная группа) показала значительное снижение соматических клеток в молоке, лейкоцитов, оксида азота, П-2 и П-8, а также медиаторов воспаления – простагландинов E2 и липоксигеназы в пробах крови (табл.). Значительное усиление противовоспалитель-

Таблица / Table  
 Действие биологически активных веществ на некоторые терапевтические маркеры при лечении коров, больных клиническим маститом  
 The biological substances action on the some therapeutics markers of cows with clinical mastitis treatment

Показатели Markers	Контрольные группы / Control groups		Подопытные группы / Experimental groups	
	1-я группа <sup>1</sup> , n=10 1st group <sup>1</sup> , n=10	2-я группа <sup>2</sup> , n=10 2nd group <sup>2</sup> , n=10	1-я группа <sup>3</sup> , n=10 1st group <sup>3</sup> , n=10	2-я группа <sup>4</sup> , n=10 2nd group <sup>4</sup> , n=10
1	2	3	4	5
На первые сутки / On the first day				
Лейкоциты в крови, 10 <sup>9</sup> /л / Leucocytes in the blood, 10 <sup>9</sup> /L	5,8±0,09	12,6±0,22*	11,8±0,12*	12,2±0,14*
СОЭ, мм/ч / ESR, mm/h	8,4±0,1	22,8±0,4*	19,6±0,2*	21,9±0,5*
IgG, мг/мл / IgG, mg/ml	15,8±0,15	28,6±0,14*	32,2±0,6*	29,6±0,34*
Оксид азота, мкмоль/л / Nitric oxide, μmol/L	14,6±0,24	82,8±0,16*	78,2±0,4*	81,8±0,13*
Липоксигеназа, пг/мл / Lipoxygenase, pg/ml	0,74±0,02	2,2±0,01*	1,90±0,04*	2,3±0,06*
Простогландины E2, пг/мл / Prostaglandin E2, pg/ml	246,2±22,4	982,5±44,2*	899,8±15,6*	896,8±15,6*
ИЛ-2, пг/мл / Interleukin-2, pg/ml	7,6±0,21	12,2±0,15*	11,80±0,28*	11,6±0,25*
ИЛ-8, пг/мл / Interleukin-8, pg/ml	79,12±2,44	468,45±1,12*	524,18±2,52*	580,14±2,54*
Фагоцитарная активность, % / Phagocytic activity, %	46,4±0,14	72,8±0,18*	76,9±1,12*	79,4±0,86*
На пятые сутки / On the fifth day				
Лейкоциты в крови, 10 <sup>9</sup> /л / Leucocytes in the blood, 10 <sup>9</sup> /L	5,6±0,25	10,9±0,14*	12,2±0,09*	6,8±0,12*
СОЭ, мм/ч / ESR, mm/h	8,8±0,4	14,5±0,3*	10,6±0,8*	12,4±0,4*
IgG, мг/мл / IgG, mg/ml	15,4±0,52	22,4±0,12*	28,8±0,54*	24,5±0,25*
Оксид азота, мкмоль/л / Nitric oxide, μmol/L	15,2±0,18	28,4±0,18*	26,2±0,14*	36,4±0,14*
Липоксигеназа, пг/мл / Lipoxygenase, pg/ml	0,78±0,07	0,81±0,04*	1,4±0,02*	0,9±0,04*
Простогландины E2, пг/мл / Prostaglandin E2, pg/ml	228,5±24,6	310,6±12,8*	780,5±19,6*	228,4±12,4*
ИЛ-2, пг/мл / Interleukin-2, pg/ml	7,8±0,18	10,1±0,16*	11,2±0,24*	7,8±0,18*
ИЛ-8, пг/мл / Interleukin-8, pg/ml	81,11±3,16	215,6±2,71*	462,4±3,12*	118,4±5,16*
Фагоцитарная активность, % / Phagocytic activity, %	44,5±0,16	68,9±0,82*	69,2±0,85*	49,7±0,28*
На десятые сутки / On the tenth day				
Лейкоциты в крови, 10 <sup>9</sup> /л / Leucocytes in the blood, 10 <sup>9</sup> /L	5,9±0,41	9,8±0,11*	7,6±0,24*	7,2±0,15*
СОЭ, мм/ч / ESR, mm/h	8,2±0,4	10,8±0,6*	10,2±0,2*	8,8±0,4*
IgG, мг/мл / IgG, mg/ml	15,9±0,54	28,2±0,15*	16,2±0,12*	15,2±0,29*
Оксид азота, мкмоль/л / Nitric oxide, μmol/L	14,8±0,15	67,8±0,34*	14,4±0,17*	15,2±0,24*
Липоксигеназа, пг/мл / Lipoxygenase, pg/ml	0,76±0,06	1,24±0,04*	0,72±0,08*	0,81±0,04*
Простогландины E2, пг/мл / Prostaglandin E2, pg/ml	220,8±12,8	480,5±15,6*	248,8±20,2*	250,4±18,5*
ИЛ-2, пг/мл / Interleukin-2, pg/ml	7,5±0,26	11,8±0,54*	7,4±0,36*	7,8±0,26*
ИЛ-8, пг/мл / Interleukin-8, pg/ml	76,81±3,16	125,98±4,21*	77,2±2,16*	76,4±3,62*
Фагоцитарная активность, % / Phagocytic activity, %	45,8±0,24	62,4±0,16*	46,2±0,62*	48,9±0,97*

Примечание: <sup>1</sup> – здоровые коровы; <sup>2</sup> – больные коровы, лечение антибиотиками; <sup>3</sup> – больные коровы, Интерферон рекомбинантный + Цефтонит; <sup>4</sup> – больные коровы, PS H. eritracus + Ceftiofur; <sup>5</sup> – больные коровы, Дивальдерон + Цефтонит; \* – достоверно при P<0,05.

Note: <sup>1</sup> – healthy cows; <sup>2</sup> – sick cows, antibiotic treatment; <sup>3</sup> – sick cows, Interferon recombinant + Ceftiofur; <sup>4</sup> – sick cows, PS H. eritracus + Ceftiofur; <sup>5</sup> – sick cows, Divalderon + Ceftiofur; \* – reliably with p<0,05.

ного эффекта вызывала гормональная составляющая (преднизолон) интрацестерального препарата Tetra-Delta.

В первой подопытной группе введение Интерферона бычьего рекомбинантного обостряло воспалительный процесс. Сохранялся высокий уровень соматических клеток в молоке, лейкоцитов, медиаторов воспаления и IgG в крови. Включалась максимальная защитная реакция организма неспецифического антибактериального иммунного ответа, что подтверждается высокой фагоцитарной активностью и высоким количеством противовоспалительных П-2 и П-8, повышающих пролиферацию лейкоцитов и эндотелиальных клеток (табл.).

При введении больным животным ПС *H. erinaceus* отмечали резкое уменьшение количества соматических клеток в молоке (с  $996,7 \pm 3,5$  тыс./см<sup>3</sup> до  $532,5 \pm 4,5$  тыс./см<sup>3</sup>), то есть наибольшее снижение во всех группах (рис.). В процессе лечения отмечены высокие цитолитические свойства вещества, вызывающие усиление фагоцитоза, и фибринолитические, выраженные в разжижении секрета молока. Было установлено снижение медиаторов воспаления (липоксигеназы и простагландинов Е) и противовоспалительных П2 и П8, что подтверждается снижением сроков выздоровления больных коров и элиминацией возбудителя *S. aureus* в молоке. Из второй подопытной группы – контаминация молока выявлена у одной коровы (10%).

Применение Диальдерона в третьей подопытной группе позволило снизить уровень соматических клеток в молоке до  $620,8 \pm 7,7$  тыс./см<sup>3</sup>, то есть на уровне использования антибиотикотерапии (рис.). В крови коров снижалось количество лейкоцитов, СОЭ, простагландинов Е2 и липоксигеназы (табл.). Отмечали снижение П2 и П8, при сохранении высокой фагоцитарной активности, что усиливало элиминацию *S. aureus* в молоке.

Диальдерон оказался оптимальным препаратом для понижения оксида азота в крови (табл.). Известно, что оксид азота как нейротрансмиттер участвует во всех межклеточных взаимодействиях, и повышение его в крови приводит к фибринолизису клеток и повреждению тканей [18]. Уменьшение количества оксида азота в эндотелиальных, миоэпителиальных клетках снижает ишемические процессы в тканях сосудов железы вымени.

По истечении десяти суток с начала лечения коров была отмечена та же тенденция. Мы не наблюдали клинических симптомов

маститы. Во второй контрольной группе (антибиотикотерапия) патогенный для белых мышей *S. aureus* выделялся из молока трёх коров (30%), то есть острый мастит переходил в хроническую форму или носительство. В результате этого процесса количество соматических клеток в молоке возросло до  $759,6 \pm 9,4$  тыс./см<sup>3</sup>, что подтверждается большим количеством П-8 в крови и повышенной фагоцитарной активностью (табл.). В подопытных группах этот показатель максимально приблизился к соматике молока здоровых коров, а после применения ПС *H. erinaceus* (вторая подопытная группа) стал даже ниже, чем в первой контрольной группе (рис.).

Во всех подопытных группах на десятые сутки с начала лечения показатели некоторых иммунных факторов в крови достигли физиологической нормы (табл.). Во второй и третьей подопытных группах выздоровление наблюдалось у 90% экспериментальных животных. При этом оптимальный клинический результат показало лечение Интерфероном бычьим рекомбинантным. Во всех пробах молока *S. aureus* не обнаружен. Если Интерферон рекомбинантный обладал явным иммуномодулирующим действием, усиливающим воспаление после 5-дневного лечения, то ПС *H. erinaceus* и Диальдерон наряду с противовоспалительными, обладали цитолитическими и лигандирующими для некоторых клеточных рецепторов свойствами.

### Заключение

В результате выполненных исследований установлена возможность замены интрацестерального антибиотико-гормонального препарата Tetra-Delta при лечении острых клинических маститов у коров на биологически активные вещества: Интерферон бычий рекомбинантный, ПС *H. erinaceus* и Диальдерон в схеме с подкожным введением антибиотика Цефтонит. Количество выздоровевших животных через 10 сут после начала лечения Интерфероном бычьим рекомбинантным было на 30% выше, а при введении ПС *H. erinaceus* и Диальдерона на 20% выше, чем при антибиотикотерапии. Введение их в схему лечения не только препятствует селекции полирезистентных штаммов *S. aureus*, но и предотвращает стафилококконосительство у коров и выделение данного микроорганизма в окружающую среду.

Применение в лечении острых маститов вышеуказанных биологических веществ сокращает

сроки выздоровления животных и позволяет использовать в пищевых целях молоко от вылеченных коров на 72 часа раньше, чем при антибиотикотерапии. При терапевтическом применении Интерферона бычьего рекомбинантного, ПС *H. erinaceus* и Диальдерона снижается количество соматических клеток в молоке до пищевых норм в течение 10 дней с начала лечения. Учитывая высокие противовоспалительные и иммунокорректирующие свойства ПС *H. erinaceus* и Диальдерона, механизм действия этих биологически активных соединений возможно изучать при различных воспалительных процессах инфекционной и неинфекционной этиологии.

### Литература

1. Ларионов Г.А., Щипцова Л.М. Безопасность молока по химическим и микробиологическим показателям // Аграрный вестник Урала. 2012. № 10 (102). С. 2–30.
2. Багманов М.А., Никулина Ю.Б. Этиологические факторы мастита // Вестник РАСХН. 2003. № 2. С. 75–76.
3. Bochniarz M., Wawron W., Szczubial M. Coagulase – negative staphylococci (CNS) as an aetiological factor of mastitis in cows // Polish of Veterinary Sciences. 2014. V. 16. P. 48–492.
4. Garcia Y.M., Barwinska-Sendra A., Tarrant E., Skaar E.P., Waldron K.J., Kehl-Fie T.E. A Superoxide dismutase capable of functioning with iron or manganese promotes the resistance of *Staphylococcus aureus* to calprotectin and nutritional immunity // PLOS Pathogens. 2017. V. 1. P. 3–22. doi:10.1371/journal.ppat.1006125.
5. Черняковская М. Форум животноводов. От идеи к действию // Белорусское сельское хозяйство. 2014. № 11 (151). С. 35–36.
6. Haenni M., Galofaro L., Ponsin C., Bes F. Staphylococcal bovine mastitis in France: enterotoxins, resistance and the human Geraldine methicillin – resistant *Staphylococcus aureus* clone // Journal Antimicrob Chemother. 2011. V. 66. P. 216–218.
7. Rinsky J., Nadimpalli M., Wing S., Hall D., Baron D., Price L.B., Larsen J., Stegger M., Stewart J., Heaney C.D. Livestock-associated methicillin and multidrug resistant *Staphylococcus aureus* is present among industrial, not antibiotic-free livestock operation workers in North Carolina // Plos-one journals. 2013. V. 8. P. 7 18. doi: 10.1371/journal.pone.0067641.
8. Шевелева С.А. Актуальные вопросы качества и безопасности молочных продуктов // Переработка молока. 2014. № 7. С. 6–11.
9. Баркова А.С., Шурманова Е.И., Липчинская А.К., Баранова А.Г. Заболеваемость коров маститами и качество молока // Аграрный вестник Урала. 2010. № 11 (2). С. 10–11.
10. Назарова Я.И., Широких И.Г., Широких А.А., Головченко В.В. Выделение и исследование моно-

сахаридного состава полисахаридных фракций гриба *Hericium erinaceus* // Фундаментальная гликология. [Электронный ресурс]. Сб. материалов IV Всерос. конф. 23–28 сентября 2018. Киров: Науч. изд-во ФГБОУ ВО «ВятГУ», 2018. С. 71–78.

11. Азямов М.А., Агалакова Т.В. Иммунокорректирующие свойства нового препарата диальдерон // Сборник научных трудов XIX Международной научно-практической конференции «Актуальные проблемы интенсивного развития животноводства». Горки: УО «Белорусская ГСХА», 2016. С. 19–23.

12. Азямов М.А., Агалакова Т.В. Изучение цитокинотерпевтического действия диальдерона в схеме лечения крупного рогатого скота при заболевании, вызванном *Pseudomonas aeruginosa* // Аграрная наука Евро-Северо-Востока. 2018. № 4 (65). С. 93–97.

13. ГОСТ ISO 13366-1-2014 Молоко. Подсчёт соматических клеток. Часть 1. Метод с применением микроскопа (контрольный метод). М.: Стандартиформ, 2016. 20 с.

14. Шевляков В.В., Филонюк В.А., Эрм Г.И., Студеничник Т.С. Метод оценки степени патогенности и опасности микроорганизмов-продуцентов и микробных препаратов // Здоровье и окружающая среда. 2014. Т. 1. № 24. С. 134–138.

15. Шахов А.Г., Масьянов Ю.Н., Рецкий М.И., Бригадиров Ю.Н., Ануфриев А.И., Беляев В.И., Золотарев А.И., Блинецова Г.Н., Бузлама В.С., Сулейманов С.М., Федоров Ю.Н., Борзенко Е.В., Ханис А.Ю., Борзенко Т.В., Артемов Б.Т., Ефанова Л.И., Манжурина О.А., Панин А.Н., Макаров Ю.А., Донник И.М., Татарчук А.Т., Горлов И.Ф., Балакирев Н.А., Майоров А.И., Емельяненко П.А., Кириллов А.К., Майоров М.А., Горячев А.А., Евдокимов В.В., Воронин Е.С., Сисягин П.Н., Исаев В.В., Реджепова Г.Р., Горбунов А.П., Бояринцев Л.Е., Клименко В.В., Каверин Н.Н., Артемьева С.С., Топурия Г.М., Топурия Л.Ю., Жуков А.П., Калюжный И.И., Мамаев Н.Х., Джамулудинова И.Н. Методические рекомендации по оценке и коррекции иммунного статуса животных. М.: Истоки, 2005. 115 с.

16. Метельская Г.А., Гуманова Н.Г. Скрининг метод определения уровня метаболитов оксида азота в сыворотке крови // Клиническая лабораторная диагностика. 2005. № 6. С. 15–18.

17. Реброва О.Ю. Статистический анализ медицинских данных. Применение пакета прикладных программ STATISTICA. М.: МедиаСфера, 2002. 312 с.

18. Gladwin M.T. Deconstructing endothelial dysfunction: soluble guanylyl cyclase oxidation and the NO resistance syndrome // J. Clin. Invest. 2006. V. 116. No. 9. P. 2330–2392.

### References

1. Larionov G.A., Schiptsova L.M. The safety of the milk for chemical and microbiological parameters // Agrarny vestnik Urala. 2012. No. 10 (102). P. 29–30 (in Russian).

2. Bagmanov M.A., Nikulina Yu.B. Etiological factors of mastitis // Vestnik RASKHN. 2003. No. 2. P. 75–76 (in Russian).
3. Bochniarz M., Wawron W., Szczubial M. Coagulase – negative staphylococci (CNS) as an aetiological factor of mastitis in cows // Polish of Veterinary Sciences. 2014. V. 16. P. 487–492.
4. Garcia Y.M., Barwinska-Sendra A., Tarrant E., Skaar E.P., Waldron K.J., Kehl-Fie T.E. A Superoxide dismutase capable of functioning with iron or manganese promotes the resistance of *Staphylococcus aureus* to calprotectin and nutritional immunity // PLOS Pathogens. 2017. V. 1. P. 3–22. doi:10.1371/journal.ppat.1006125.
5. Chernyakovskaya M. Forum of livestock. From idea to action // Belorusskoe sel'skoe hozyajstvo. 2017. No. 11 (151). P. 35–36 (in Russian).
6. Haenni M., Galofaro L., Ponsin C., Bes F. Staphylococcal bovine mastitis in France: enterotoxins, resistance and the human Geraldine methicillin – resistant *Staphylococcus aureus* clone // Journal Antimicrob Chemother. 2011. V. 66. P. 216–218.
7. Rinsky J., Nadimpalli M., Wing S., Hall D., Baron D., Price L.B., Larsen J., Stegger M., Stewart J., Heaney C.D. Livestock-associated methicillin and multidrug resistant *Staphylococcus aureus* is present among industrial, not antibiotic-free livestock operation workers in North Carolina // Plos-one journals. 2013. V. 8. P. 7–18. doi: 10.1371/journal.pone.0067641.
8. Sheveleva S.A. Topical issues of quality and safety of dairy products // Pererabotka moloka. 2014. No. 7. P. 6–11 (in Russian).
9. Barkova A.S., Shurmanova E.I., Lipchinskaya A.K., Baranova A.G. The incidence of mastitis in cows and milk quality // Agrarnyy vestnik Urala. 2010. No. 11 (2). P. 10–11. (in Russian).
10. Nazarova Ya.I., Shirokih I.G., Shirokih A.A., Golovchenko V.V. Isolation and study of monosaccharide composition of polysaccharide fractions of the fungus *Hericium erinaceus* // Fundamental glycobiology. [Internet resource] Sb. materialov IV Vseros. konf. 23–28 sentyabrya 2018. Kirov: Nauch. izd-vo FGBOU VO «VyatGU», 2018. P. 71–78 (in Russian).
11. Azyamov M.A., Agalakova T.V. The new drug dialderon immunocorrective properties // Sbornik nauchnyh trudov XIX Mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoy konferencii «Aktual'nye problemy intensivnogo razvitiya zhivotnovodstva». Gorki: UO «Belorusskaya GSKHA», 2016. P. 19–23 (in Russian).
12. Azyamov M.A., Agalakova T.V. The study of therapeutic cytokines action of dialderon in the treatment of cattle for diseases caused by *Pseudomonas aeruginosa* // Agrarnaya nauka Evro-Severo-Vostoka. 2018. No. 4 (65). P. 93–97 (in Russian).
13. GOST ISO 13366-1-2014 Milk. Enumeration of somatic cells. Part 1. Microscopic method (reference method). Moskva: Standartinform, 2016. 20 p. (in Russian).
14. Shevlyakov V.V., Filonyuk V.A., Ehrm G.I., Studenichnik T.S. Method of assessment of pathogenicity and danger of microorganisms-producers and microbial preparations // Zdorov'e i okruzhayushchaya sreda. 2014. V. 1. No. 24. P. 134–138 (in Russian).
15. Shakhov A.G., Masyanov Yu.N., Retskiy M.I., Brigadirov Yu.N., Anufriev A.I., Belyaev V.I., Zolotarev A.I., Bliznetsova G.N., Buzlama V.S., Suleymanov S.M., Fedorov Yu.N., Borzenko E.V., Khanis A.Yu., Borzenko T.V., Artemov B.T., Efanova L.I., Manzhurina O.A., Panin A.N., Makarov Yu.A., Donnik I.M., Tatarchuk A.T., Gorlov I.F., Balakirev N.A., Mayorov A.I., Emelyanenko P.A., Kirillov A.K., Mayorov M.A., Goryachev A.A., Evdokimov V.V., Voronin E.S., Sisyagin P.N., Isaev V.V., Redzhepova G.R., Gorbunov A.P., Boyarintsev L.E., Klimenko V.V., Kaverin N.N., Artemeva S.S., Topuriya G.M., Topuriya L.Yu., Zhukov A.P., Kalyuzhnyy I.I., Mamaev N.Kh., Dzhamuludina I.N. Methodical guidelines for the evaluation and correction of the immune status of animals. Moskva: Istoki, 2005. 115 p. (in Russian).
16. Metel'skaya G.A., Gumanova N.G. Screening method for determining the level of nitric oxide metabolites in blood serum // Klinicheskaya laboratornaya diagnostika. 2005. No. 6. P. 15–18 (in Russian).
17. Rebrova O.Yu. Statistical analysis of medical data. Application software package STATISTICA. Moskva: MediaSfera, 2002. 312 p. (in Russian).
18. Gladwin M.T. Deconstructing endothelial dysfunction: soluble guanylyl cyclase oxidation and the NO resistance syndrome // J. Clin. Invest. 2006. V. 116. No. 9. P. 2330–2392.

## К юбилею Светланы Владимировны Дёгтевой

Среди даже самых талантливых женщин – в науке, искусстве, спорте – не многим выпадает великая честь и ответственность руководить большим научным коллективом. В ряду умелых и талантливых руководителей-директоров научно-исследовательских институтов – достойное место занимает Светлана Владимировна Дёгтева, доктор биологических наук, широко известный учёный в области геоботаники, лесной типологии, охраны и рационального использования природных ресурсов. Под её руководством Институт биологии Коми НЦ УрО РАН продолжает славные традиции Анатолия Ивановича Таскаева, добивается больших успехов в науке, входит в число ведущих академических институтов России.

Многие годы Светлана Владимировна Дёгтева с коллегами проводит исследования растительного покрова на территориях Печоро-Илычского государственного природного биосферного заповедника и национального парка «Югыд ва». Результаты её исследований вносят значительный вклад в развитие геоботаники и высоко востребованы в практической деятельности органов власти и крупных предприятий Республики Коми, а также научных работников, аспирантов, магистрантов.

Она является автором и соавтором 300 научных работ, в том числе 23 монографий. Это серия монографий «Биологическое разнообразие особо охраняемых природных территорий Республики Коми», «Кадастр особо охраняемых природных территорий Республики Коми» и др. Данные исследования имеют огромную научную и практическую ценность.

Светлана Владимировна – председатель Учёного совета Института биологии Коми НЦ УрО РАН, член Объединённого учёного совета по биологическим наукам УрО РАН, член Научного совета РАН по проблемам ботаники, заместитель председателя диссертационного совета Д 004.007.01 по защите докторских диссертаций в Институте биологии Коми НЦ УрО РАН.

Она успешно сочетает разные виды деятельности: успешную научную работу в области геоботаники и лесной типологии; хозяйственные и организа-



ционные заботы, которые являются неотъемлемой частью работы руководителя.

И при всех своих научных регалиях, званиях и должностях Светлана Владимировна остаётся внимательным, чутким к нуждам коллег человеком. Она оказывает постоянную поддержку и прикладывает много усилий для развития одного из самых молодых подразделений Института биологии – лаборатории биомониторинга. Ни одна просьба коллектива лаборатории не остаётся без внимания, а проблемы – без её конкретного решения. Её требовательный подход к выполнению намеченных целей обязывает коллектив лаборатории биомониторинга не останавливаться на достигнутом, развивать новые научные направления, участвовать в конкурсных проектах, совершенствовать научный журнал «Теоретическая и прикладная экология», заместителем главного редактора которого она на протяжении многих лет является.

Редакция журнала «Теоретическая и прикладная экология», коллектив лаборатории биомониторинга поздравляют Светлану Владимировну Дёгтеву с Юбилеем, выражают сердечную благодарность и искреннюю признательность за внимание и поддержку. Желаем дальнейших достижений в реализации намеченных планов и уверены в том, что под её чутким и мудрым руководством достижения Института биологии будут преумножаться, а коллектив будет пополняться талантливыми молодыми исследователями, которые прославят российскую науку.

От редколлегии журнала «Теоретическая и прикладная экология»  
и коллектива лаборатории биомониторинга  
Т. Я. Ашихмина

Индекс 82027, 48482



ISSN 1995-4301



9 771995 430004