



2023

*Теоретическая  
и прикладная*

**ЭКОЛОГИЯ**

ISSN 1995-4301 (PRINT)  
ISSN 2618-8406 (ONLINE)

**№ 2**

Theoretical and  
Applied Ecology



ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ  
ПРОБЛЕМЫ ЭКОЛОГИИ

МЕТОДОЛОГИЯ  
И МЕТОДЫ  
ИССЛЕДОВАНИЙ.  
МОДЕЛИ И ПРОГНОЗЫ

МОНИТОРИНГ  
ПРИРОДНЫХ  
И АНТРОПОГЕННО  
НАРУШЕННЫХ  
ТЕРРИТОРИЙ

ХИМИЯ ПРИРОДНЫХ  
СРЕД И ОБЪЕКТОВ

ЭКОЛОГИЗАЦИЯ  
ПРОИЗВОДСТВА

АГРОЭКОЛОГИЯ

РЕМЕДИАЦИЯ И  
РЕКУЛЬТИВАЦИЯ

ЭКОТОКСИКОЛОГИЯ

ПОПУЛЯЦИОННАЯ  
ЭКОЛОГИЯ

ЭКОЛОГИЯ И КЛИМАТ

СОЦИАЛЬНАЯ  
ЭКОЛОГИЯ

НАУЧНЫЙ ЖУРНАЛ

<http://envjournal.ru>



## в Правлении НП «БТК» 12 предприятий и учреждений



**Биотехнологический кластер (БТК) – конкурентоспособная межрегиональная и межотраслевая группа, созданная в 2009 г. в Кировской области на инициативной основе, включающая в себя разнородные предприятия, объединённые технологическими процессами в рамках единой экономической стратегии и использующая синергетический эффект путём интеграции имеющихся материальных и нематериальных активов её членов.**

Всего в состав участников НП «БТК» входят 44 организации: 3 государственных университета; 3 института РАН; научно-исследовательский и проектный институт; лицей; инжиниринговая фирма; 2 консалтинговые фирмы; 28 научно-производственных предприятий; 1 МИП; 3 коммерческих организации.

Цель НП «БТК»: обеспечение условий для реализации и коммерциализации инновационных проектов, способствующих внедрению безотходных технологий, основанных на использовании биомассы (биоресурсов).

### **НП «БТК» реализует проекты:**

**1.** Использование в развитии сельских территорий элементов органического производства. Внедрение в технологические процессы животноводства и растениеводства биогазового оборудования для переработки отходов сельского хозяйства с получением органических удобрений, тепловой и электрической энергии. Биогазовое оборудова-

ние работает в Кировской области, Республике Башкортостан, Волгоградской, Екатеринбургской, Новосибирской, Амурской областях, Алтайском крае.

**2.** Масштабирование производства биосорбентов, позволяющих ликвидировать аварийные разливы нефтепродуктов через деструкцию углеводородов до состояния экологически безопасных составляющих. налажены системные поставки для «Транснефть», «Норникель», аэродромов и нефтехранилищ на значительной территории России.

**3.** В стадии готовности к реализации находится проект «Биоэнергетическая деревня» для Прилузского района Республики Коми и Малмыжского района Кировской области. На основе традиционного хозяйствования, а также переработки отходов лесного и сельского хозяйств обеспечиваются условия для развития территории и благоприятной среды обитания человека.

**4.** Реализация проекта «Вятский чернозём» позволила разработать ассортиментный ряд комплексных удобрений. Осуществляется выпуск органических и органоминеральных удобрений, насыщенных микроорганизмами, под различные сельскохозяйственные растительные культуры.

Кроме того, готовы для масштабирования, тиражирования 12 проектов в области органического хозяйства, экологии, безотходного производства.

*В. Н. Туруло,  
президент НП «БТК»*



**Теоретическая  
и прикладная  
ЭКОЛОГИЯ**  
№ 2, 2023  
<http://envjournal.ru>

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 (№ 2470 по состоянию на 25.04.2023).

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

Журнал издаётся с 2007 года.

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

**Главный редактор Т.Я. Ашихмина**, д.т.н., профессор, главный научный сотрудник Вятского государственного университета, зав. лабораторией ИБ ФИЦ Коми НЦ УрО РАН

**Зам. главного редактора С.В. Дёгтева**, д.б.н., член-корр. РАН, профессор, директор ФИЦ Коми НЦ УрО РАН

**Зам. главного редактора Л.И. Домрачева**, д.б.н., профессор, профессор Вятского государственного агротехнологического университета

**Зам. главного редактора И.Г. Широких**, д.б.н., главный научный сотрудник, 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. Скугорева**, к.б.н., доцент, научный сотрудник ИБ ФИЦ Коми НЦ УрО РАН

**Технические секретари:**

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

**В.В. Рутман**, младший научный сотрудник Вятского государственного университета

Адрес редакции:

610000, Кировская область, 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.

Регистрационный номер и дата принятия решения о регистрации: серия ПИ № ФС77-74434 от 23 ноября 2018 г.

Подписной индекс ПС248 в каталоге «Подписные издания» официального каталога АО «Почта России».

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>

Издательство: ООО «О-Краткое»

Адрес издательства: 610020, Кировская область, г. Киров, ул. Свободы, 67.

Оригинал-макет – Татьяна Коршунова, перевод – Григорий Кантор, фотографии на 1-й и 4-й обложке – Александр Широких,

администратор сайта журнала – Вячеслав Рутман, выпускающий редактор – Мария Зелаева.

Директор издательства «О-Краткое» Евгений Дрогов © Оформление. Издательство «О-Краткое»

Дата выхода номера: 26.06.2023.

Тираж 250 экз. Заказ № 1936. Цена свободная.

Отпечатано в ООО «Кировская областная типография».

Адрес типографии: 610004, Кировская область,

г. Киров, ул. Ленина, 2в

**ЧЛЕНЫ РЕДАКЦИОННОЙ КОЛЛЕГИИ:**

- А.М. Асхабов** д.г.-м.н., академик РАН, профессор, научный руководитель ФИЦ Коми НЦ УрО РАН
- Т.К. Головкин** д.б.н., профессор, главный научный сотрудник ИБ ФИЦ Коми НЦ УрО РАН
- А. Гросс** д.х.н., профессор Орхусского университета (Дания)
- Е.В. Дабах** к.б.н., доцент, старший научный сотрудник ИБ ФИЦ Коми НЦ УрО РАН
- М.В. Дородников** к.с.-х.н., доцент, научный сотрудник Университета Гёттингена им. Георга Августа (Германия)
- М. Ж. Журинов** д.х.н., академик НАН Республики Казахстан, профессор, президент НАН РК, генеральный директор АО «ИТКЭ имени Д.В. Сокольского»
- Г.М. Зенова** д.б.н., профессор, профессор Московского государственного университета им. М.В. Ломоносова
- Г.Я. Кантор** к.т.н., научный сотрудник ИБ ФИЦ Коми НЦ УрО РАН
- 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, профессор, директор Института микробиологии НАН Беларуси
- Л.В. Кондакова** д.б.н., профессор, профессор Вятского государственного университета
- В.П. Мешалкин** д.т.н., академик РАН, профессор, директор Международного института логистики ресурсосбережения и технологической инноватики (НОЦ) РХТУ им. Д.И. Менделеева
- А.В. Кучин** д.х.н., академик РАН, профессор, зав. отделом и зав. лабораторией Института химии ФИЦ Коми НЦ УрО РАН
- В.Н. Лажнецов** д.г.н., академик РАН, профессор, советник РАН
- В.З. Латыпова** д.х.н., член-корр. Академии наук Республики Татарстан, профессор, профессор Казанского федерального университета
- Ли Юй** д.б.н., иностранный член РАН (КНР), профессор, директор Института микологии Цзилинского аграрного университета
- С.Г. Литвинцев** к.с.-х.н., доцент, проректор по науке и инновациям Вятского государственного университета
- В.А. Малинников** д.т.н., профессор, профессор Московского государственного университета геодезии и картографии
- А.А. Москалёв** д.б.н., член-корр. РАН, профессор РАН, зав. лабораторией ИБ ФИЦ Коми НЦ УрО РАН
- С.В. Пестов** к.б.н., доцент, доцент Вятского государственного университета
- В.С. Петросян** д.х.н., профессор, зав. лабораторией Московского государственного университета
- С.А. Рубцова** д.х.н., старший научный сотрудник, директор Института химии ФИЦ Коми НЦ УрО РАН
- В.П. Савиных** д.т.н., академик РАН, профессор, президент Московского государственного университета геодезии и картографии
- Ф. Скапини** д.б.н., профессор Университета Флоренции (Италия)
- В.А. Сысуев** д.т.н., академик РАН, профессор, научный руководитель Федерального аграрного научного центра Северо-Востока им. Н.В. Рудницкого
- В.А. Терехова** д.б.н., доцент, профессор Московского государственного университета им. М.В. Ломоносова
- Е.И. Тихомирова** д.б.н., профессор, зав. кафедрой Саратовского государственного технического университета
- Т.А. Трифонова** д.б.н., профессор, профессор Московского государственного университета им. М.В. Ломоносова
- В.И. Холстов** д.х.н., профессор, руководитель центра ФГУП «ГосНИИОХТ»
- М.Х. Хусейн** д.б.н., профессор Университета Ассиут (Египет)
- В.В. Шириев** д.б.н., с.н.с., в.н.с. ВНИИ охотничьего хозяйства и звероводства им. проф. Б.М. Житкова
- В.Т. Юнблюд** д.и.н., профессор, президент Вятского государственного университета



# Theoretical and Applied ECOLOGY

No. 2, 2023

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.

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

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, Chief Researcher of Vyatka State University, Head of Laboratory of IB FRC Komi SC UB RAS

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

Doctor in Biology, Corresponding Member of RAS, Professor, Director of FRC Komi SC UB RAS

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

Doctor in Biology, Professor, Professor of Vyatka State Agrotechnological University

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

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

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

Doctor in Geography, Professor, Leading Researcher of the Institute of Geography RAS

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

PhD in Biology, Associate Professor, Researcher of IB FRC Komi SC UB RAS

**Technical Secretaries:**

**T.I. Kut'yavina,** PhD in Biology,

Senior Researcher of Vyatka State University,

**V.V. Rutman,** Junior Researcher of Vyatka State University

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.

Editorial Address: 36 Moskovskaya St., Kirov, Kirov region, Russia, 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. Registration number and date of the decision on registration: series PI No. FS77-74434 on November 23, 2018.

Subscription index PC248 in the joint catalog "Press of Russia".

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>

Publisher: the publishing house of "O-Kratkoe"

Publisher's Address: 67 Svobody St., Kirov region, Russia, Kirov, 610020. E-mail: okrat@okrat.ru.

Designer – Tatiana Korshunova. Translation – Grigoriy Kantor. Photos on the 1st and 4th cover – Alexander Shirokikh. Administrator of Web site – Vyacheslav Rutman. Managing editor – Mariya Zelayeva. Director of the publishing house "O-Kratkoe" Evgeniy Drogov.

© Publishing house "O-Kratkoe".

Release date: June 26, 2023.

Circulation 250 copies. Order No. 1936. Free price.

"Kirov regional printing house", LTD.

Printing Address: 2b Lenin St., Kirov, Kirov region, Russia, 610004

## THE EDITORIAL BOARD OF THE JOURNAL "THEORETICAL AND APPLIED ECOLOGY"

- A.M. Askhabov** Doctor in Geology and Mineralogy, Academician of RAS, Professor, Scientific Director of FRC Komi SC UB RAS
- T.K. Golovko** Doctor in Biology, Professor, Chief Researcher of IB FRC Komi SC UB RAS
- A. Gross** Doctor in Chemistry, Professor of Aarhus University (Denmark)
- E.V. Dabakh** PhD in Biology, Associate Professor, Senior Researcher of IB FRC Komi SC UB RAS
- M.V. Dorodnikov** PhD in Agricultural Sciences, Associate Professor, Professor of Georg August University of Göttingen (Germany)
- M.Zh. Zhurinov** Doctor in Chemistry, Academician of the National Academy of Sciences of the Republic of Kazakhstan, Professor, President of NAS RK, General Director of "D.V. Sokolsky Institute of Fuel, Catalysis and Electrochemistry"
- G.M. Zenova** Doctor in Biology, Professor, Professor of Lomonosov Moscow State University
- G.Ya. Kantor** PhD in Technical Sciences, Researcher of IB FRC Komi SC UB RAS
- E.Yu. Kolbovsky** Doctor in Geography, Leading Researcher, Professor, Professor of Lomonosov Moscow State University
- E.I. Kolomiyets** Doctor in Biology, Professor, 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, Professor of Vyatka State University
- V.P. Meshalkin** Doctor in Technical Sciences, Academician of RAS, Professor, Director of International Institute of Logistics Resource saving and technological Innovations of Mendeleev University of Chemical Technology
- A.V. Kuchin** Doctor in Chemistry, Academician of RAS, Professor, Head of Department and Head of Laboratory of Institute of Chemistry FRC Komi SC UB RAS
- V.N. Lazhentsev** Doctor in Geography, Professor, RAS Advisor
- V.Z. Latypova** Doctor in Agriculture, Corresponding Member of Tatarstan Academy of Sciences, Professor, Professor of Kazan Federal University
- Li Yu** Doctor in Biology, Foreign Associate of RAS (China), Professor, Director of Mycology Institute of Jilin Agricultural University
- S.G. Litvinets** PhD in Agricultural Sciences, Associate Professor, Vice-Rector for Science and Innovation of Vyatka State University
- V.A. Malinnikov** Doctor in Technical Sciences, Professor, Professor of Moscow State University of Geodesy and Cartography
- A.A. Moskalev** Doctor in Biology, Corresponding Member of RAS, Chief of the Laboratory of IB FRC Komi SC UB RAS
- S.V. Pestov** PhD in Biology, Associate Professor, Associate Professor of Vyatka State University
- V.S. Petrosyan** Doctor in Chemistry, Professor, Head of Laboratory of Moscow State University
- S.A. Rubtsova** Doctor in Chemistry, Senior Researcher, Director of the Institute of Chemistry FRC Komi SC UB RAS
- V.P. Savinykh** Doctor in Technical Sciences, Academician 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, Professor, Scientific Director Federal Agricultural Research Center of North-East named N.V. Rudnitsky
- V.A. Terekhova** Doctor in Biology, Assistant Professor, Professor of Lomonosov Moscow State University
- E.I. Tikhomirova** Doctor in Biology, Professor, Head of Department of Saratov State Technical University
- T.A. Trifonova** Doctor in Biology, Professor, Professor of Lomonosov Moscow State University
- V.I. Kholstov** Doctor in Chemistry, Professor, Head of the Center of the Federal State Unitary Enterprise "State Scientific Research Institute of Organic Chemistry and Technology"
- M.H. Hussein** Doctor in Biology, Professor of University of Assiut University (Egypt)
- V.V. Shiryayev** Doctor in Biology, Senior Researcher, Leading Researcher of All-Russian Research Institute of Hunting and Fur Breeding, prof. B.M. Zhitkov
- V.T. Yungblud** Doctor in History, Professor, President of Vyatka State University

# СОДЕРЖАНИЕ

## ОБЗОРЫ

- Л. Н. Григорян, Ю. В. Батаева* Экологические особенности и биотехнологические возможности почвенных актинобактерий (обзор) .....6
- Т. Я. Ашихмина, Е. В. Товстик, Т. А. Адамович* Экологические факторы, определяющие естественную и антропогенную инвазию борщевика Сосновского *Heracleum sosnowskyi* Manden., меры борьбы с ним (обзор) .....20

## СТАТЬИ

- Б. И. Кочуров, М. А. Мовчан* Применение геоинформационного моделирования и фрактального анализа при геоэкологической оценке урбогеосистем .....32
- Т. А. Трифонова, И. Н. Курочкин, Ю. Н. Курбатов* Тяжёлые металлы в почвах различных функциональных зон урбанизированных территорий: оценка содержания и экологического риска ..... 38

- Л. В. Кондакова, Е. В. Дабах* Мониторинг почвенной альгоцианофлоры на техногенной территории .....47
- И. А. Лиханова, Е. М. Перминова, Г. В. Железнова, Ю. В. Холопов, Е. М. Лаптева* Влияние сплошнолесосечных рубок на биоразнообразии среднетаёжных ельников черничных Северо-Востока европейской части России .....56
- Т. В. Панкеева, Н. В. Миронова* Пространственно-временные изменения макрофитобентоса в прибрежных ландшафтах у мыса Коса Северная (Севастополь) ....66

- В. А. Седых, С. А. Куролан, Л. Н. Беляева, Г. И. Мазуров, А. Т. Козлов, В. П. Закусилов* Загрязнение воздушной среды формальдегидом и оценка риска канцерогенных эффектов ..... 73
- А. В. Горбунов, Б. В. Ермолаев, Д. Б. Петренко, О. И. Окينا, Г. А. Грановская* Биоаккумуляция тяжёлых металлов и других токсичных элементов в мышцах рыб бассейна р. Волги ..... 80

- Л. Н. Ольшанская, Е. Н. Лазарева, Е. А. Татаринцева, О. А. Арефьева, Е. В. Яковлева, З. А. Симонова* Гальваношламы – источник вторичных материальных ресурсов при получении пигментов-наполнителей для лакокрасочных изделий .....89
- М. Ю. Дзгелев* Повышение эффективности биологической очистки промышленных стоков в составе городских сточных вод .....96

- А. И. Фокина, С. Г. Скугорева, Е. А. Кислицына* Влияние состава торфосмесей на биохимические показатели растений Melissa лекарственной .....104
- Д. С. Фомин, А. Н. Чащин* Пространственно-временной анализ влажности почв сельскохозяйственных полей .....113

- D. V. Tarabukin* Potential of three plant species for phytoremediation of oil-contaminated soils in northern conditions ..... 120

- Т. Ю. Плюснина, Р. Н. Червицов, С. С. Хрущев, Д. Г. Киселева, Т. В. Дрозденко, Е. И. Тихомирова, Г. Ю. Ризниченко, Т. К. Антал* Выявление токсического воздействия тяжёлых металлов на фитопланктон с помощью анализа индукционных кривых флуоресценции хлорофилла методами машинного обучения .....126

- Ю. И. Варакина, А. С. Аксёнов, Д. Е. Лахманов, Т. Ю. Сорокина, Л. Ф. Попова* Мониторинг стойких органических загрязнителей в промысловых рыбах Российской Арктики .....135

ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ  
ПРОБЛЕМЫ  
ЭКОЛОГИИ

МЕТОДОЛОГИЯ  
И МЕТОДЫ  
ИССЛЕДОВАНИЙ.  
МОДЕЛИ  
И ПРОГНОЗЫ

МОНИТОРИНГ  
ПРИРОДНЫХ  
И АНТРОПОГЕННО  
НАРУШЕННЫХ  
ТЕРРИТОРИЙ

ХИМИЯ ПРИРОДНЫХ  
СРЕД И ОБЪЕКТОВ

ЭКОЛОГИЗАЦИЯ  
ПРОИЗВОДСТВА

АГРОЭКОЛОГИЯ

РЕМЕДИАЦИЯ  
И РЕКУЛЬТИВАЦИЯ

ЭКОТОКСИКОЛОГИЯ

ПОПУЛЯЦИОННАЯ  
ЭКОЛОГИЯ

<b>ПОПУЛЯЦИОННАЯ ЭКОЛОГИЯ</b>	<p><i>М. А. Студёнова, И. И. Студёнов, Д. В. Чупов</i> Зообентос русла реки Северная Двина ..... 147</p> <p><i>Н. П. Савиных, А. А. Тетерин</i> Состояние листовенничников и перспективы выращивания листовенницы сибирской в подзоне хвойно-широколиственных лесов ..... 155</p> <p><i>О. Б. Жданова, И. И. Окулова</i> Эколого-биологические и морфологические особенности возбудителя трихинеллёза в Кировской области и оптимизация мер борьбы ..... 164</p> <p><i>Н. А. Карнаухова, Г. К. Зверева</i> Состояние ценопопуляций бобовых (Fabaceae) на степных пастбищах Республики Алтай ..... 172</p> <p><i>Д. В. Попыванов, А. А. Широких, Ю. А. Злобина</i> Находка теплолюбивого гриба <i>Laetiporus sulphureus</i> на территории г. Кирова .... 181</p> <p><i>Л. В. Кондакова, Н. В. Сырчина, Л. В. Пилип, И. А. Кондакова</i> Влияние навозных стоков на почвенные фототрофные микроорганизмы ..... 190</p>
<b>СОЦИАЛЬНАЯ ЭКОЛОГИЯ</b>	<p><i>Д. Г. Домрачев, А. А. Кирилловых, В. Н. Пугач</i> Рациональное лесопользование в России: проблемы и перспективы совершенствования организационно-правового механизма ..... 198</p> <p><i>Т. Я. Ашихмина, Л. И. Домрачева, И. П. Погорельский, А. А. Леценко, А. Ю. Миронина, В. С. Лобастов, А. В. Сенькин</i> Биоремедиация техногенно деградированных земель после завершения специальной военной операции на территории новых субъектов Российской Федерации ..... 209</p>
<b>ХРОНИКА</b>	<p>Памяти И. П. Погорельского ..... 217</p> <p><i>Т. Я. Ашихмина</i> Юбилей Н. П. Савиных ..... 218</p> <p><i>Т. Я. Ашихмина, С. Ю. Огородникова</i> XVIII Всероссийская научно-практическая конференция с международным участием «Экология родного края: проблемы и пути их решения» ..... 219</p>

## CONTENTS

### REVIEWS

<b>THEORETICAL PROBLEMS OF ECOLOGY</b>	<p><i>L. N. Grigoryan, Yu. V. Bataeva</i> Ecological features and biotechnological possibilities of soil actinobacteria (review) .....6</p> <p><i>T. Ya. Ashikhmina, E. V. Tovstik, T. A. Adamovich</i> Ecological factors determining natural and anthropogenic invasion of <i>Heracleum sosnowskyi</i> Manden., measures to combat it (review) .....20</p>
--	--

### ARTICLES

<b>METHODOLOGY AND RESEARCH METHODS. MODELS AND FORECASTS</b>	<p><i>B. I. Kochurov, M. A. Movchan</i> Application of geoinformation modeling and fractal analysis in the geocological assessment of urban geosystems .....32</p> <p><i>T. A. Trifonova, I. N. Kurochkin, Yu. N. Kurbatov</i> Heavy metals in soils of various functional zones of urbanized territories: assessment of the content and environmental risk .....38</p>
<b>MONITORING NATURAL AND ANTHROPOGENICALLY DISTURBED AREAS</b>	<p><i>L. V. Kondakova, E. V. Dabakh</i> Monitoring of soil algocyanoflora in the technogenic territory .....47</p> <p><i>I. A. Likhanova, E. A. Genrikh, E. M. Perminova, G. V. Zheleznova, Yu. V. Kholopov, E. M. Lapteva</i> The effects of clear cutting on the biodiversity of middle taiga blueberry spruce forests in the North-East of European Russia .....56</p> <p><i>T. V. Pankeeva, N. V. Mironova</i> Spatio-temporal changes of macrophytobenthos in coastal landscapes at Cape Kosa Severnaya (Sevastopol) .....66</p>
<b>CHEMISTRY OF NATURAL ENVIRONMENTS AND OBJECTS</b>	<p><i>V. A. Sedykh, S. A. Kurolap, L. N. Belyaeva, G. I. Mazurov, A. T. Kozlov, V. P. Zakusilov</i> Formaldehyde air pollution and risk assessment of carcinogenic effects .....73</p>

CHEMISTRY  
OF NATURAL  
ENVIRONMENTS  
AND OBJECTS

*A. V. Gorbunov, B. V. Ermolaev, D. B. Petrenko, O. I. Okina, G. A. Granovskaya* Bioaccumulation of heavy metals and other toxic elements in the muscles of fish in the Volga River basin ..... 80

ECOLOGIZATION  
OF PRODUCTION

*L. N. Olshanskaya, E. N. Lazareva, E. A. Tatarintseva, O. A. Aref'eva, E. V. Yakovleva, Z. A. Simonova* Galvanic sludge is a source of secondary material resources in the production of filler pigments for paints and varnishes ..... 89  
*M. Yu. Dyagelev* Improving the efficiency of biological treatment of industrial wastewater as part of urban wastewater ..... 96

AGROECOLOGY

*A. I. Fokina, S. G. Skugoreva, E. A. Kislitsyna* The influence of the composition of peat mixtures on the biochemical parameters of *Melissa officinalis* plants ..... 104  
*D. S. Fomin, A. N. Chashchin* Spatio-temporal analysis of soil moisture in the experimental agricultural fields ..... 113

REMEDIAION  
AND RECULTIVATION

*D. V. Tarabukin* Potential of three plant species for phytoremediation of oil-contaminated soils in northern conditions ..... 120

ECOTOXICOLOGY

*T. Yu. Plyusnina, R. N. Chervitsov, S. S. Khrushchev, D. G. Kiseleva, T. V. Drozdenko, E. I. Tikhomirova, G. Yu. Riznichenko, T. K. Antal* Identification of the toxic effects of heavy metals on phytoplankton by the analysis of chlorophyll fluorescence induction curves using machine learning ..... 126

POPULATION  
ECOLOGY

*Yu. I. Varakina, A. S. Aksenov, D. E. Lakhmanov, T. Yu. Sorokina, L. F. Popova* Monitoring of persistent organic pollutants in commercial fish in the Russian Arctic ..... 135  
*M. A. Studenova, I. I. Studenov, D. V. Chupov* Zoobentos of the Severnaya Dvina River ..... 147  
*N. P. Savinykh, A. A. Teterin* The state of larch forests and prospects for growing Siberian larch in the subzone of coniferous-deciduous forests ..... 155  
*O. B. Zhdanova, I. I. Okulova* Ecological, biological and morphological features of the causative agent of trichinosis in the Kirov Region and optimization of control measures ..... 164  
*N. A. Karnaukhova, G. K. Zvereva* Status of coenopopulations of legumes (Fabaceae) on steppe pastures of the Altai Republic ..... 172  
*D. V. Popyanov, A. A. Shirokikh, Yu. A. Zlobina* Finding of the thermophilic fungus *Laetiporus sulphureus* on the territory of Kirov ..... 181  
*L. V. Kondakova, N. V. Syrchina, L. V. Pilip, I. A. Kondakova* Manure runoff impact on soil phototrophic microorganisms ..... 190

SOCIAL ECOLOGY

*D. G. Domrachev, A. A. Kirillovych, V. N. Pugach* Rational forest management in Russia: problems and prospects of improving the organizational and legal mechanism ..... 198  
*T. Ya. Ashikhmina, L. I. Domracheva, I. P. Pogorelsky, A. A. Leschenko, A. Yu. Mironina, V. S. Lobastov, A. V. Senkin* Bioremediation of technogenically degraded lands after the completion of a special military operation on the territory of new subjects of the Russian Federation ..... 209

CHRONICLE

In memory of I. P. Pogorelsky ..... 217  
*T. Ya. Ashikhmina* Anniversary of N. P. Savinykh ..... 218  
*T. Ya. Ashikhmina, S. Yu. Ogorodnikova* XVIII All-Russian scientific and practical conference with international participation "Ecology of the native land: problems and ways to solve them" ..... 219

## Экологические особенности и биотехнологические возможности почвенных актинобактерий (обзор)

© 2023. Л. Н. Григорян, к. б. н., в. н. с.,  
Ю. В. Батаева, к. б. н., доцент, зав. кафедрой,  
Астраханский государственный университет им. В. Н. Татищева,  
414000, Россия, г. Астрахань, пл. Шаумяна, д. 1,  
e-mail: lilyagrigoryan90@gmail.com

Актинобактерии – грамположительные аэробные и факультативно анаэробные бактерии, имеющие тенденцию к образованию ветвящихся гиф, образующих мицелий. Основная их роль заключается в разложении сложных полимеров в почве: лигнина, целлюлозы, хитина, гумусовых веществ; формировании плодородия; продукции антибиотических веществ и других биологически активных соединений. Актинобактерии продуцируют в окружающую среду комплекс вторичных экзометаболитов различного состава с алифатическими, карбоциклическими, гетероциклическими, азотистыми, кислород- и серосодержащими соединениями. Большинство выделенных вторичных метаболитов обладают антибиотическими, антимикробными, противовирусными, гербицидными, инсектицидными свойствами. Биотехнологические возможности почвенных актинобактерий, продуцирующих биологически активные вещества с широким спектром экологического влияния, используются при разработке биопрепаратов полифункционального действия для различных отраслей промышленности. Цель данной работы – анализ экологических особенностей и биотехнологических возможностей почвенных актинобактерий. В обзоре описано распространение актинобактерий в различных типах почв, в том числе с присутствием поллютантов, состав продуцируемых метаболитов, взаимоотношения с другими микроорганизмами, а также биотехнологические свойства и возможность использования актинобактерий для разработки биопрепаратов для агроэкосистем.

**Ключевые слова:** актинобактерии, почвенные экосистемы, антагонистическая активность, биотехнологический потенциал.

## Ecological features and biotechnological possibilities of soil actinobacteria (review)

© 2023. L. N. Grigoryan ORCID: 0000-0002-1132-2043  
Yu. V. Bataeva ORCID: 0000-0003-1064-3731  
Astrakhan State University name of V. N. Tatishcheva,  
1, Shaumyana Square, Astrakhan, Russia, 414000,  
e-mail: lilyagrigoryan90@gmail.com

Actinobacteria are gram-positive aerobic and facultative anaerobic bacteria that tend to form branching hyphae capable of developing into mycelium. Their main role is in the decomposition of complex polymers in the soil: lignin, cellulose, chitin, humus substances; fertility formation; production of antibiotic substances; accumulation of biologically active compounds. Actinobacteria secrete into the environment a complex of secondary exometabolites of various compositions with aliphatic, carbocyclic, heterocyclic, nitrogenous, oxygen-containing and sulfur-containing compounds. Most of the isolated secondary metabolites have antibiotic, antimicrobial, antiviral, herbicidal, insecticidal properties. Biotechnological capabilities of soil actinobacteria producing biologically active substances with a wide range of environmental effects are used in the development of multifunctional biologics for various industries. Actinobacteria play a crucial role in optimizing the growing conditions of plants, and therefore there is a natural interest in studying the factors that influence the relationship between actinobacteria and various crops in specific soil conditions. The development of this issue is an important link in the ecological characterization of the soil microbial complex and it will help to develop the theoretical foundations for the targeted regulation of the interactions of actinobacteria with phytopathogenic microorganisms and insect pests. The purpose of this work is to analyze the ecological features and biotechnological capabilities of soil actinobacteria. The review describes the distribution of actinobacteria in various types of soils, including those with the presence of pollutant; the composition of the metabolites produced; relationships with other microorganisms, as well as biotechnological properties and the possibility of using actinobacteria for the development of biological products for agroecosystems.

**Keywords:** actinobacteria, soil ecosystems, antagonistic activity, biotechnological potential.



Актинобактерии или актиномицеты (*Actinobacteria*) – грамположительные аэробные и факультативно анаэробные бактерии. По современной классификации актинобактерии относятся к домену *Bacteria* филуму *Actinomycetota* [1]. Имеют вид тонких, диаметром от 0,2 до 1,0 мкм и длиной около 2,5 мкм прямых или немного изогнутых палочек с утолщёнными концами. Часто образуют нити длиной до 10–50 мкм. Большинство актинобактерий характеризуется образованием гиф воздушного мицелия, на котором находятся споры [2]. У бактерий р. *Streptomyces* нити мицелия не распадаются на фрагменты и могут образовывать обильный воздушный мицелий с длинными цепочками спор [3].

Актинобактерии вносят свой вклад в глобальный углеродный цикл путём расщепления растительной биомассы. Основная их роль заключается в разложении сложных полимеров в почве: лигнина, целлюлозы, хитина, гумусовых веществ; формировании плодородия, продукции антибиотических веществ, накоплении биологически активных соединений [4].

Актинобактерии являются постоянным компонентом почвенных и ризосферных микробных сообществ. С одной стороны, можно говорить о свойстве спор легко переносить неблагоприятные внешние воздействия, с другой, – о приспособленности мицелия использовать различные источники питания. Однако в исследованиях ризосферной микробиоты актинобактериям уделялось меньше внимание, чем грибам и другим бактериям. Актинобактерии могут играть важную роль в развитии растений, участвуя в снабжении последних элементами питания, витаминами, фитогормонами, защищая их от болезней [5–7].

Актинобактерии продуцируют витамины, гормоны, токсины, ферменты, стимуляторы роста и другие полезные для человека соединения, поэтому являются промышленно и фармацевтически важными организмами [8, 9]. Следует отметить, что именно почвенные актинобактерии экстремальных местообитаний способны продуцировать редкие метаболиты со специфическими свойствами [10]. Следовательно, поиск и исследование свойств и перспектив практического использования почвенных актинобактерий является актуальной задачей.

Цель данной работы – анализ экологических особенностей и биотехнологических возможностей почвенных актинобактерий.

## Объекты и методы исследования

Объектом литературного обзора являются почвенные актинобактерии. Для обзора использовали литературные источники (2000–2022 гг.) из архива авторов, а также проведён поиск по следующим ключевым словам: «актинобактерии», «почвенные экосистемы», «метаболиты», «антагонистическая активность», «биотехнологический потенциал» при помощи поисковых систем Яндекс и Google, из научной электронной библиотеки eLIBRARY.RU, PubMed и ведущих иностранных журналов по этой тематике. Найденную информацию анализировали в соответствии с заявленными разделами статьи.

## Распространение актинобактерий в почве

Актинобактерии широко распространены в почвах всего земного шара, однако на их качественный и количественный состав значительное влияние оказывает географическое положение местности, тип почвы, влагоёмкость, её химические и физические свойства, окультуренность и другие особенности. В большом количестве актинобактерии распространены в почве благодаря их способности легко приспосабливаться к среде обитания и потреблять органические соединения, недоступные для других микроорганизмов.

Доминирование актинобактерий в почве связано с присутствием полимеров природного и антропогенного происхождения: нефтепродуктов [11], кератина [8], хитина [12] и др. В микрокосмах, загрязнённых углеводородами, по сравнению с ненарушенными системами, отмечалось увеличение доли филума *Actinobacteria*, особенно рода *Galiella* (в образцах, загрязнённых бензином) и рода *Nocardioidea* (в образцах, загрязнённых дизельным топливом) [12]. Внесение азотсодержащего полисахарида хитина в микрокосмы на фоне поллютантов на порядок увеличивало численность популяций метаболически активного микробного сообщества, способствовало оструктурированию почвы и формированию агрономически ценной структуры, а также приводило к снижению количества остаточных нефтепродуктов.

По результатам метабаркодинга в филуме *Actinobacteria* в опытных образцах с углеводородами обнаружены представители как устойчивых, так и чувствительных (семейство *Micromonosporineae*) к нефтезагрязнению

родов [11]. При внесении в почву нефти в микробном сообществе формировалась достаточно специфичная группа метаболически активных представителей, обладающих набором функциональных генов, отвечающих за деструкцию таких труднодоступных соединений, к которым относится нефть.

Определены количественный и качественный составы актинобактерий в урбопочвах промышленной и транспортной зоны г. Воронежа [13]. На основании многолетних исследований городских почв выявлены реакции актинобактерий на антропогенное загрязнение.

Актинобактерии распространены не только в почвах городских и техногенных территорий, но и в экстремальных природных зонах. Плотность популяций этих бактерий в солончаках и засоленных пустынных почвах варьирует от сотен до десятков тысяч колониеобразующих единиц в 1 г в зависимости от типа почвы и горизонта, что на 1–3 порядка меньше, чем в почвах зональных типов [14]. Учитывая тот факт, что засоленные почвы характеризуются, как правило, щелочной реакцией среды, в них можно зафиксировать присутствие не только галофильных, но и алкалофильных актинобактерий. Установлено присутствие в стрептомицетном комплексе засоленных почв умеренно галоалкалофильных стрептомицетов, для оптимального роста которых необходима концентрация хлорида натрия, равная 5%, и pH 8. Исследователями зафиксировано наличие в стрептомицетном комплексе солончаков умеренно галофильных культур, растущих при концентрации в среде хлорида натрия, равной 8% [15]. В пустынных засоленных почвах наблюдалось доминирование галоалкалофильных актинобактерий *Streptomyces pluricilirescens*, *S. prunicolor*. Среди термофильных актинобактерий в пустынных периодически прогреваемых почвах, кроме представителей рода *Streptomyces*, обнаружены такие роды, как *Actinomadura*, *Saccharopolyspora*, *Streptosporangium*. Обнаружена специфичность актиномицетных комплексов на термальных полях в слабо-развитой слоисто-пепловой почве, в которой термофильные формы представлены только родом *Micromonospora*, мезофильные – родом *Microbispora* [15]. Установлено, что численность термотолерантных актиномицетов в почвах пустынных, горных и вулканических районов, нагреваемых до высоких температур, сопоставима или превышает численность мезофильных форм [16].

Актинобактерии являются неотъемлемыми компонентами микробного комплекса торфяных почв. В почвах кислого ряда (типичной торфяной, дерново-подзолистой, таёжного подзола) показано доминирование ацидофильных представителей рода *Micromonospora* [15]. В кислых почвах выявлено присутствие комплекса ацидофильных актинобактерий. В слабощелочных почвах – аллювиальной луговой на карбонатных отложениях и каштановой солонцеватой – комплекса почвенных ацидофильных актинобактерий не обнаружено. Выявлена степень зависимости роста от кислотности среды и содержания соли в среде для алкалофильных, галофильных и галоалкалофильных актинобактерий [17].

Наиболее часто в лесных и горных экологических системах встречаются представители родов *Streptomyces* и *Micromonospora*, где их распространённость достигает 60% [18]. Среди стрептомицетов встречаются виды секции *Cinereus* серии *Violaceus*, *Helvolum Flavus*, серии *Helvolum*, секции *Azureus* серии *Coeruleus*, секции *Roseus* серии *Fuscus*.

В бурых лесных почвах, различающихся по своему географическому положению и биоклиматическим условиям, доминируют по частоте встречаемости (93–100%) и относительному обилию (33–90%) стрептомицеты. К типичным частым видам в бурых лесных почвах отнесены представители рода *Micromonospora*, которые, в зависимости от конкретных экологических условий, могут переходить в разряд доминантов [19].

Исследования [20] показали, что в чернозёмах доминируют *S. violaceamaculatus* (секция *Roseus*), *S. sporoherbeus* (секция *Azureus*), *S. aerionidulus* (секция *Cinereus*), *S. enduracidicus* (секция *Cinereus*) и *S. grisinus* (секция *Cinereus*), а в засоленных почвах – *S. violaceamaculatus* (секция *Roseus*) и *S. aerionidulus* (секция *Cinereus*).

Многочисленными родами бактерий на каменистых образованиях с доступными субстратами в виде соединений магния, хрома и меди, были *Streptomyces*, *Kocuria* и *Arthrobacter*. Все культивируемые бактерии принадлежали к классу Actinobacteria. Они были способны переносить высокие температуры (до 45 °C) и накопление солей, продуцировали ферменты, участвующие в солюбилизации питательных веществ, такие как фосфатаза, амилаза, протеаза, хитиназа и целлюлаза [21].

По данным исследований распространённости и видового разнообразия актинобакте-

рий, культуры рода *Streptomyces* составляют 80–95% от всех актинобактерий, населяющих почву, а среди известных биоактивных микробных вторичных метаболитов подавляющее большинство продуцируется актинобактериями, 80% которых относятся к роду *Streptomyces* [2].

### Особенности и синтез метаболитов актинобактерий

Актинобактерии – активные продуценты вторичных метаболитов. Вторичные метаболиты не являются необходимыми элементами для роста и размножения микроорганизма и продуцируются, как правило, в стационарной фазе процесса ферментации или в определенных условиях в экосистеме [22]. Исследователи отмечают, что метаболиты актинобактерий представляют собой многокомпонентные комплексы различных по химическому строению природных соединений – антибиотиков, литических ферментов, аминокислот, терпеноидов, алкалоидов, что затрудняет формирование устойчивости к ним у вредных организмов [23–25]. Данные соединения могут быть использованы в медицине, ветеринарии, защите растений и других областях.

Представители рода *Nocardiosis* синтезируют различные биологически активные соединения, противоопухолевые вещества, индукторы опухолей, токсины и иммуномодуляторы. Они также продуцируют экзоферменты, такие как амилазы, хитиназы, целлюлазы,  $\beta$ -глюканазы, инулиназы, ксиланазы и протеазы, которые эффективны в борьбе с грибными фитопатогенами [26]. Бактерии *N. umidischolae* вырабатывают соединение валиномицин – пептидный антибиотик, повышающий проницаемость мембраны для ионов калия. Тейхоевые кислоты клеточной стенки являются таксономическими маркерами для бактерий р. *Nocardiosis* [27].

Под влиянием стрессовых воздействий актинобактерии способны синтезировать новые антибиотики [3]. Исследовано пигментообразование у штаммов *S. lucensis* ВКПМ Ас-1743 и *S. violaceus* ВКПМ Ас-1734, хранившихся при температуре -12 °С и -18 °С с последующим культивированием культур на гидролизатах крахмала. Интенсивно пигментированный штамм *S. violaceus* ВКПМ Ас-1734 более устойчив к температурным изменениям и устойчив к воздействию кислорода воздуха при глубинной ферментации в интенсивном

режиме воздухообеспечения. Эффект более выражен при культивировании клеток после низкотемпературного хранения, что обусловлено накоплением меланина – сильного антиоксиданта [28].

Результаты воздействия магнитного поля заданных параметров на накопление биомассы и содержание в ней липидных соединений культивируемого на жидкой комплексной среде штамма *S. canosus* CNMN-Ас-02 показали, что процесс восстановления липидообразующей способности после воздействия магнитного поля и пересевов происходит активнее, чем способность к накоплению биомассы этим штаммом при культивировании на жидкой комплексной среде [29].

Штамм *S. albidoflavus* ATCC 25422 обладает высокой ферментативной активностью по отношению к кератину. Данный штамм использовался для создания биосовместимого консорциума по переработке отходов птицефабрик в кормовую добавку для сельскохозяйственных животных [8]. Метаболиты штамма *S. graminofaciens* способны к биоэкстракции меди из электронных отходов [30]. Штамм *S. tsukubensis* ВКМ Ас-2618Д способен синтезировать поликетиды, а именно иммунодепрессант такролимус [31]. Компонентный состав биомассы продуцента авермектинов – *S. avermitilis* включает липиды, белки и полисахаридный комплекс. В составе липидов *S. avermitilis* присутствуют преимущественно насыщенные жирные кислоты (86%), содержание моно- и полиненасыщенных (эссенциальных) жирных кислот одинаково и составляет около 7%. Установлено, что полисахаридный комплекс – муреин штамма *S. avermitilis* имеет полиамфолитную природу и обладает высокими сорбционными свойствами по отношению как к основным, так и к кислотным красителям, что позволяет рекомендовать его к использованию в качестве энтеросорбента [32].

Штаммы *S. castelarensis* FIM 95-F1 и *S. castelarensis* ATCC 15191 продуцируют скопафунгин [33] и камфамицин [34] соответственно. Штамм *S. fradiae* синтезирует фосфомицин [25], *S. septatus* ТН-2 – металлоэндопептидазу [35]. Изучение метаболитов штамма *Streptomyces* sp. с противоопухолевыми, противовирусными и антибактериальными свойствами показало присутствие липстатина, макролидных лактонов, клавулановой кислоты и холестероксидазы [36].

Моэномицин А, синтезируемый стрептомицетами, является мощным антибакте-

риальным препаратом в отношении грамположительных патогенов [37]. Штамм *S. tendae* ВКПМ Ас-1980 – продуцент антибиотика ИНА 5812, который по химическому строению является оригинальным линейно-циклическим гликопептидным соединением, активным в отношении грамположительных патогенов *in vitro* и высокоэффективным в опытах *in vivo* при экспериментальном лечении стафилококкового сепсиса у белых мышей. Штамм *S. tendae* ВКПМ Ас-1980 обладает повышенной антибиотической активностью и при глубинном культивировании накапливает 2500 мкг/мл противобактериального антибиотика [38]. Штамм *Streptomyces* sp. синтезирует  $\beta$ -1,3-глюканазу, в связи с чем может быть эффективным средством биоконтроля чёрной гнили у орхидей [39].

Штамм *S. olivochromogenes* S103, активный в отношении *Candida albicans* (65%), синтезирует 15 летучих органических соединений, в частности, D-лимонен (с 55,81%) [40]. Предполагается, что ингибирующее действие штамма *Streptomyces* sp. strain 2K1 (MT280320) в отношении *F. proliferatum* АС (MT280199), помимо летучих органических соединений (спирты, органические кислоты, меркаптаны и сложные эфиры), определяется присутствием метилгидроксиламина [41]. Штамм *Streptomyces* sp., продуцент летучих цианидов, подавлял развитие *Fusarium oxysporum* и *Rhizoctonia bataticola*, вызывающих болезни сорго [42]. Исследование химического состава метаболитов штамма *S. amritsarensis* V31 выявило в качестве преобладающего соединения 6-амино-5-нитрозопиримидин-2,4-диол. Метаболический комплекс данного штамма подавлял развитие фитотрофа риса и ингибировал развитие фитопатогенных микромицетов: *R. solani* (7,5–65%), *Alternaria alternata* (5,5–52,7%), *Aspergillus flavus* (8–30,7%), *Sarocladium oryzae* (11–55,5%), *Sclerotinia sclerotiorum* (29,7–40,5%) [43]. Ряд синтезируемых *Streptomyces* spp. метаболитов, включая полиоксин Д, стрептомицин и касугамицин, применяются для обработки вегетирующих растений [44].

Формирование вторичного обмена, отличающегося многоуровневой химической структурой метаболитов, способствует образованию взаимосвязей между отдельными группами микроорганизмов. Следует отметить, что данные метаболиты выполняют функцию аллелохимических агентов, представляя собой вещества, обеспечивающие продуктивное взаимодействие между разными видами.

### Положительное и антагонистическое воздействие актинобактерий на микроорганизмы

Сукцессия прокариот в разных типах почв характеризуется доминированием грамотрицательных бактерий на начальных этапах, при этом на последующих этапах преобладают актинобактерии. Способность стрептомицетов создавать ассоциации с водорослями наблюдается в природных альгобактериальных ценозах на выходах карбонатных пород, где стрептомицетам, наряду с водорослями, принадлежит ценозообразующая роль [2, 45].

Актинобактерии нередко выступают антагонистами при взаимодействии с фитопатогенами. Механизмы борьбы актинобактерий с грибными фитопатогенами изучены на генетическом уровне экспрессии функциональных генов, отвечающих за образование хитиназ. Так, бактерии, продуцирующие хитиназы, проявляют антагонизм *in vitro* по отношению к грибам, а хитиназы стрептомицетов ингибируют рост грибов и разрушают их клеточную стенку. Хитиназная активность у актинобактерий коррелирует с повышенной концентрацией хитина в клеточных стенках грибов [46]. Увеличение количества клеток и снижение разнообразия почвенного прокариотического комплекса связано с развитием селективной группы гидролитического комплекса хитиндеградирующих микроорганизмов.

В лабораторных имитационных экспериментах выявлена фунгицидная активность цианобактерий (*Nostoc linckia*, *N. commune* и *Microchaeta tenera*) и стрептомицета *S. luteogriseus* на патогенный микромицет *F. oxysporum*. Оба антагониста оказали существенное влияние на структуру грибной популяции *F. oxysporum*, сдерживая в большей (*N. linckia*) или в меньшей (*S. luteogriseus*) степени рост грибного мицелия в прикорневой зоне проростков пшеницы. Если в ризоплане максимальное подавление мицелиального роста, обладающего наибольшим инфекционным потенциалом, было обусловлено антагонистической активностью цианобактерии *N. linckia*, то в ризосферной почве максимальное ингибирование мицелиального роста гриба отмечено в случае совместного применения культур *N. linckia* и *S. luteogriseus* [46].

Штаммы *S. antimycoticus* 8A13, *S. castelarensis* A4, *S. alfalfae* 6-IZ-12, *S. anulatus* T-2-20, *S. griseolus* 3-IZ-7, *S. flavogriseus* TK5 могут рассматриваться как перспективные биоконтрольные агенты в отношении вредоносных

грибных фитопатогенов из родов *Fusarium*, *Bipolaris* и *Alternaria*. Широким спектром отличались *S. castelarensis* А4 и *S. antimycoticus* 8А13, ингибируя рост шести тест-культур, с зонами ингибирования от 23 до 44 мм. Наиболее интенсивно оба штамма подавляли рост грибов *B. sorokiniana*, *A. alternata* и *F. avenaceum*. Изоляты *S. alfalfae* 6-IZ-12 и *S. griseolus* 3-IZ-7 из почвы другой климатической зоны (субтропиков), отличались от них, ингибируя только по четыре тест-культуры, и имели качественно иной набор грибных мишеней: наиболее интенсивно подавляли рост *F. oxysporum*, но не угнетали виды *F. proliferatum*, *F. culmorum* и *F. avenaceum*. Штамм *S. flavogriseus* ТК5 был активен в отношении четырёх грибов, но величина зон ингибирования (20–25 мм) значительно уступала аналогичному показателю других стрептомицетов, за исключением *S. anulatus* Т-2-20, который подавлял рост *B. sorokiniana*, *F. culmorum* и *F. avenaceum* с диаметром зон ингибирования от 18 до 25 мм [47].

Ацидофильные стрептомицеты активно подавляли рост фитопатогенных грибов, особенно при росте на подкисленных средах, нейтрофильные стрептомицеты активны в отношении грамположительных бактерий [48]. Из чернозёма выделен штамм *Streptomyces* sp. 89, способный синтезировать полиены и обладающий антагонистическими свойствами по отношению к фитопатогенным грибам и бактериям [9]. Штаммы *S. misionensis* АСТ66 и *S. albidoflavus* АСТ77 являются перспективными агентами биоконтроля фитопатогенов [50]. Штамм *Streptomyces* spp. является эффективным колонизатором растений и способен использовать различные механизмы борьбы с фитопатогенными грибами на злаках [6].

Из почвенного образца выделен штамм *S. geldanamycininus* РСАМ05297 с антагонистической активностью в отношении цианобактерий *Aphanizomenon flos-aquae*, *Microcystis aeruginosa*, *Nodularia spumigena*, *Planktothrix agardhii*, вызывающих «цветение» водоёмов. Из клеток стрептомицета выделен сырец биоцидных соединений Z374, который, подавляя рост цианобактерий, вызывал снижение содержания микроцистинов в клетках цианобактерий *M. aeruginosa* и *P. agardhii* и снижение концентраций токсинов в среде. Представленная работа является первым сообщением о биоцидной активности почвенной актинобактерии *S. geldanamycininus* в отношении цианобактерий, в связи с чем, сырец биоцидных соединений Z374 можно рассматривать как потенциальный регулятор

массового развития цианобактерий, вызывающих «цветение» воды в водоёмах [51].

Штамм *S. atrovirens* РК288-21, выделенный из ризосферы морских водорослей, синтезирует два антимикробных соединения 2-гидрокси-5-(3-метилбут-2-энил) бензальдегид (В1) и 2-гепта-1,5-диенил-3,6-дигидрокси-5-(3-метилбут-2-энил) бензальдегид (В2), которые активны в отношении *Edwardsiella tarda* и *Streptococcus iniae* [52].

Из кишечников многоножек видов *Nedyopus dawydoffiae* и *Orthomorpha* sp. (класс Diplopoda) и из их кормовых субстратов, представляющих собой растительные остатки, выделены актинобактерии с антимикробной активностью. Выявлена гетерогенность по признаку антибиотикообразования в популяциях *S. pratensis* и *S. termitum* в отношении метициллинрезистентного штамма *Staphylococcus aureus* ИНА 00761 (MRSA) и ванкомицинрезистентного штамма *Leuconostoc mesenteroides* ВКПМ В-4177 (VRLM) [53].

Анализ литературных источников подтверждает сведения о том, что во всём мире учёными интенсивно исследуются актинобактерии – антагонисты, которые не только угнетают фитопатогены в зоне корня, но и вырабатывают антибиотики, поступающие в ткани растений, и делают их более устойчивыми к возбудителям болезней.

#### Биотехнологические возможности актинобактерий и биопрепараты на их основе для агробиотехнологий

Одним из условий получения высокоэффективных биопрепаратов является наличие активных и стабильных штаммов-продуцентов, поэтому очевидна необходимость знания их биологических особенностей: культурально-морфологических и физиолого-биохимических признаков, изменчивости, жизнеспособности, целевой активности.

На основе актинобактерий производятся биопрепараты, проявляющие антагонистическую активность. Патентный поиск показал ряд штаммов стрептомицетов, перспективных для создания на их основе средств защиты растений: *S. avermitilis* НИЦБ 132 – продуцент авермектинов, эффективный в отношении круглых червей, зудных клещей [54], *S. avermitilis* ССМ 4697 – продуцент авермектинов, оказывающих токсическое действие на клещей [55], *S. chrysomallus* Р-21 действует против грибных и вирусных фитопатогенов [56], *S. globisporus* К-35/15 – используется

для защиты растений от вредных насекомых – фитофагов [57]. *Streptomyces hygroscopicus* subsp. ЦКМ В-4561 обладает фунгицидными, бактерицидными и инсектицидными свойствами [58].

На основе штамма *S. avermitilis* УКМ Ас-2179з разработан инсектицидный биопрепарат Аверком, действующим веществом которого является антибиотик авермектин. Высокая антипаразитарная активность Аверкома в отношении фитонематод *Meloidogyne incognita* и положительное влияние на растения свидетельствуют о перспективности использования данного штамма для производства экологически безопасного полифункционального препарата с нематоцидным и фитостимулирующим действиями [59]. Штамм *S. chrysomallus* Р-21 является продуцентом полифункционального биопрепарата Хризомал, обладающего фунгицидным, фиторегуляторным и антивирусным действием [60].

На основе стрептомицетов разработаны биопрепараты Касугомицин [61] и коммерческий препарат Endorse [62] для защиты риса от фитопатогенных грибов *Pyricularia oryzae* и *Rhizoctonia solani* соответственно. Такие препараты, как Actinovate (*S. lydicus* WYEC 108) и Mycostop (*S. griseoviridis* K61) предназначены для внесения в почву, Micro108 (*S. lydicus* WYEC108) – для обработки семян [63].

Обработка посевов зерновых культур биопрепаратом, изготовленным на основе живых клеток *S. castelarensis* А4, в фазу кущения, привела, по сравнению с контролем без обработки, к снижению степени поражения пшеницы листовой (на 15,2%) и стеблевой (на 1,8%) ржавчинами, септориозом (на 1,7%), ячменя – листовой ржавчиной (на 19,1%) и септориозом (на 1,3%), овса – корневыми гнилями (на 17,4%), листовой (на 4,7%) и корончатой (на 17,4%) ржавчинами и красно-бурой пятнистостью (на 17,5%) [7]. Штамм *S. antimycoticus* 8А1-3 (МТ114717) эффективен в подавлении возбудителей корневых гнилей и фузариозного увядания гороха посевного (*Pisum sativum* L.), *S. castelarensis* А4 (МК784817) – в подавлении аскохитоза данной культуры [64].

Штамм *Streptomyces* sp. А-4 подавляет развитие фитопатогенов, продуцирует ауксины (до 18 мкг/мл), стимулирует рост (увеличение значений высоты побега на 38–66 и длины корней на 23–25%) и колонизирует корни (уровень численности в нестерильной ризосферной почве –  $10^5$ – $10^6$  КОЕ/г) растений. Антифунгальная активность изолята обу-

словлена сочетанием таких механизмов, как ингибирование прорастания грибных спор, лизис мицелия грибов и ограничение развития грибов благодаря летучим соединениям [65].

Из почвенных экосистем Астраханской области с различной солёностью выделены штаммы бактерий *S. carpaticus* RCAM04697, *N. umidischolae* RCAM04882, *N. umidischolae* RCAM04883, оказывающие ингибирующее действие на фитовирусы, а также обладающие высокими фитостимулирующими, инсектоакарицидными, фунгицидными и антиоксидантными свойствами, что делает их перспективными продуцентами для создания биопрепаратов [10, 66, 67].

Предпосевная обработка семян бактериальным препаратом на основе штамма *S. hygroscopicus* А-4 в сочетании с двукратным опрыскиванием травостоя оказала положительное влияние на формирование кормовой массы у клевера лугового (*Trifolium pratense*) сорта Кировский 159 и показала достоверное превышение урожайности [68]. В полевом эксперименте изучено влияние бактериализации штаммом *S. hygroscopicus* А4 семян и растений голозёрного овса на численность микроскопических грибов в ризоплане, поражение овса корневыми гнилями, стеблевой и корончатой ржавчиной, фузариозом метёлки, а также на элементы структуры продуктивности растений. В отличие от химического протравителя, который снижал по сравнению с контролем показатели структуры продуктивности растений, применение биопрепарата на основе *S. hygroscopicus* А4 способствовало повышению массы зерна с растения и массы 1000 зёрен [69].

Следует отметить, что актинобактерии играют важнейшую роль в оптимизации условий произрастания растений, что проявляется в стимуляции их роста, развития и увеличении урожайности. В связи с этим, закономерен интерес к изучению факторов, которые могут оказывать влияние на связь актинобактерий и различных сельскохозяйственных культур в конкретных почвенных условиях. Разработка данного вопроса является важным звеном в экологической характеристике микробного комплекса почвы и поможет развить теоретические основы для целенаправленного регулирования взаимодействий актинобактерий с фитопатогенными микроорганизмами.

## Заключение

Расширение сведений об объёме и разнообразии актинобактерий, их месте среди про-

чих микробов, населяющих почву, развивает наши представления о них, как продуцентах специфических биологически активных веществ и вызывает огромный интерес к их исследованию.

Анализ литературных данных показал, что, несмотря на большое количество работ, посвящённых исследованию актинобактерий, экологические свойства и биотехнологические возможности почвенных актинобактерий до конца не изучены и требуют дальнейших комплексных исследований. Учитывая высокую степень полиморфизма актинобактерий, несомненно, важным, с научной и практической точек зрения, представляется исследование естественной изменчивости штаммов-продуцентов. Уровень специфичности и биологической активности актинобактерий определяется химической природой синтезируемых веществ, поэтому важно изучение химического состава активных компонентов метаболитных комплексов, механизмов действия молекулярных структур и генетических детерминант.

*Работа выполнена в рамках реализации Программы развития Астраханского государственного университета им. В. Н. Татищева на 2021–2030 годы («Приоритет 2030»).*

### Литература

- Oren A., Garrity G.M. Valid publication of the names of forty-two phyla of prokaryotes // *International Journal of Systematic and Evolutionary Microbiology*. 2021. V. 5. No. 71 (10). P. 1–7.
- Звягинцев Д.Г., Зенова Г.М. Экология актиномицетов. М.: ГЕОС, 2001. 256 с.
- Лысак В.В. Микробиология. Минск: БГУ, 2007. 426 с.
- Bhatti A.A., Haq S., Bhat R.A. Actinomycetes benefaction role in soil and plant health // *Microbial Pathogenesis*. 2017. V. 111. P. 458–467.
- Чулун Б., Сапармырадов К.А., Алимова Ф.К., Миндубаев А.З. Сравнение показателей фитотоксичности, фунгицидной и бактерицидной активности стрептомицетов из различных местообитаний // *Бутлеровские сообщения*. 2014. Т. 38. № 6. С. 147–152.
- Colombo E.M., Kunova A., Cortesi P., Saracchi M., Pasquali M. Critical assessment of *Streptomyces* spp. able to control toxigenic fusaria in cereals: A literature and patent review // *International Journal of Molecular Sciences*. 2019. V. 20. No. 24. P. 6119–6127.
- Широких И.Г., Бакулина А.В., Назарова Я.И., Широких А.А., Козлова Л.М. Влияние *Streptomyces castelarensis* A4 на заболеваемость и урожайность зерновых культур полевого севооборота // *Микология и фитопатология*. 2020. Т. 54. № 1. С. 59–66.
- Дмитриева А.И., Алексеенко А.В., Белова Д.Д., Пискаева Н.И., Терещук Л.В. Кератиказы *Streptomyces* и *Bacillus*: свойства и направления использования // *Техника и технология пищевых производств*. 2020. Т. 50. № 4. С. 602–615.
- Поляк Ю.М., Сухаревич В.И. Выявление и регуляция антагонистических свойств почвенного актиномицета *Streptomyces* sp. 89 // *Известия Российской академии наук. Серия биологическая*. 2021. № 5. С. 547–555.
- Батаева Ю.В., Григорян Л.Н., Курашов Е.А., Крылова Ю.В., Федорова Е.В., Явид Е.Я., Ходонович В.В., Яковлева Л.В. Изучение метаболитов *Streptomyces carpathicus* RCAM04697 для создания экологически безопасных средств защиты растений // *Теоретическая и прикладная экология*. 2021. № 3. С. 172–178.
- Манучарова Н.А., Ксенофонтова Н.А., Каримов Т.Д., Власова А.П., Зенова Г.М., Степанов А.Л. Изменение филогенетической структуры метаболически активного прокариотного комплекса почв под влиянием нефтяного загрязнения // *Микробиология*. 2020. Т. 89. № 2. С. 222–234.
- Манучарова Н.А., Кутейникова Ю.В., Иванов П.В., Николаева С.К., Трофимов В.Т., Степанов П.Ю., Тяпкина Е.В., Липатов Д.Н., Степанов А.Л. Молекулярный анализ гидролитической прокариотной компоненты почв, загрязнённых нефтепродуктами и восстановленных внесением хитина // *Микробиология*. 2017. Т. 86. С. 373–382.
- Назаренко Н.Н. Адаптивные диапазоны реакции комплекса актиномицетов городских почв // *Агроэкологический вестник: материалы международной научно-практической конференции, посвящённой году экологии в России*. 2017. С. 222–227.
- Зенова Г.М., Оборотов Г.В., Норовсурэн ЁЖ., Федотова А.В., Яковлева Л.В. Галофильные и алкалофильные стрептомицеты засоленных почв // *Почвоведение*. 2007. № 11. С. 1347–1351.
- Зенова Г.М., Манучарова Н.А., Звягинцев Д.Г. Экстремофильные и экстремотолерантные актиномицеты в почвах разных типов // *Почвоведение*. 2011. № 4. С. 457–478.
- Zvyagintsev D.G., Zenova G.M., Oborotov G.V. Moderately haloalkaliphilic actinomycetes in salt-affected soils // *Eurasian Soil Science*. 2009. V. 42. No. 13. P. 1515–1520.
- Селянин В.В., Зенова Г.М., Можарова Н.В., Закалюкина Ю.В., Звягинцев Д.Г. Ацидофильные и алкалофильные актиномицеты в кислых, нейтральных и щелочных почвах // *Почвоведение*. 2005. № 5. С. 590–593.
- Абушова А.Р., Гасанова С.А., Касимзаде М.А. Экологические особенности редких родов актиномицетов в почвах Азербайджана // *Вестник Днепропетровского университета. Биология*. 2010. Т. 2. № 1. С. 3–7.
- Широких И.Г., Назарова Я.И., Широких А.А., Ашихмина Т.Я. Сообщества актиномицетов в бурозёмах лесных экосистем с различным типом климата // *Теоретическая и прикладная экология*. 2018. № 1. С. 80–87.

20. Гришко В.Н., Сыщикова О.В. Структурно-функциональные особенности сообщества актиномицетов в некоторых чернозёмах и засоленных почвах Украины // Почвоведение. 2010. № 2. С. 221–228.
21. Saadouli I., Marasco R., Mejri L., Hamden H., Guerfali M.M., Stathopoulou P., Daffonchio D., Cherif A., Ouzari H.I., Tsiamis G., Mosbah A. Diversity and adaptation properties of actinobacteria associated with Tunisian stone ruins // Front Microbiol. 2022. No. 13. P. 832–997.
22. Базилбеков Б.М., Доолоткелдиева Т.Д. Оптимизация состава питательных сред и технические показатели получения инокулума для производства биопродукта на основе *Streptomyces* бактерий // Наука, новые технологии и инновации Кыргызстана. 2021. № 4. С. 94–98.
23. Waksman S.A., Schatz A., Reynolds D.M. Production of antibiotic substances by actinomycetes // Annals of the New York Academy of Sciences. 2010. V. 1213. No. 1. P. 112–124.
24. Рудакова Н.Н., Алексеева М.Г., Даниленко В.Н. Гены аминокликозидфосфотрансфераз у почвенных бактерий рода *Streptomyces* // Успехи современной биологии. 2020. Т. 140. № 3. С. 211–224.
25. Wang B., Knox H.L., Zhou S., Blaesi E.J., Krebs C., Wang R.X., Booker S.J., Blaszczyk A.J. Stereochemical and mechanistic investigation of the reaction catalyzed by from *Streptomyces fradiae*, a cobalamin-dependent radical s-adenosylmethionine methylase // Biochemistry. 2018. V. 57. No. 33. P. 4972–4984.
26. Bennura T., Ravikumara A., Zinjardea S., Javdekar V. *Nocardioopsis* species: incidence, ecological roles and adaptations // Microbiological Research. 2015. V. 174. P. 33–47.
27. Naumova I.B., Tul'Skaya E.M., Streshinskaya G.M., Kozlova Y.I., Potekhina N.V., Shashkov A.S., Evtushenko L.I., Stackebrandt E. Cell wall teichoic acids: structural diversity, species specificity in the genus *Nocardioopsis*, and chemotaxonomic perspective // FEMS Microbiology Reviews. 2001. V. 25. No. 3. P. 269–284.
28. Принцева А.А., Шарова Н.Ю., Выборнова Т.В. Влияние низкой температуры хранения на пигментообразование штаммов актиномицетов *Streptomyces lucensis* и *Streptomyces violaceus* // Евразийское Научное Объединение. 2018. № 12–3 (46). С. 160–162.
29. Бурцева С.А., Бырса М.Н., Чеботарь В.И., Шибаева И.И., Шибаев А.Ю., Сидоренко А.С. Влияние магнитного поля на накопление биомассы и содержание в ней липидов у *Streptomyces canosus* CNMN-AC-02, культивируемого на жидкой среде // Химическая физика и мезоскопия. 2020. Т. 22. № 3. С. 289–298.
30. El-Badry M.T., Abdel-Fatah Y., Ibrahim I.A., Abdel-Halim S., Sharada H. Role of *Actinomyces* sp. in bio-extraction of copper from electronic waste // Bio-interface Research in Applied Chemistry. 2022. V. 12. No. 5. P. 6723–6740.
31. Пошехонцева В.Ю., Фокина В.В., Тарлачков С.В., Мачулин А.В., Шутов А.А., Донова М.В. *Streptomyces tsukubensis* ВКМ Ас-2618Д – эффективный продуцент такролимуса // Биотехнология. 2021. № 1 (37). С. 26–36.
32. Бровко О.С., Жильцов Д.В., Ивахнов А.Д., Богданов М.В. *Streptomyces avermitilis*: компонентный состав, свойства // Химия растительного сырья. 2020. № 1. С. 57–66.
33. Fei P., Yang X., Lu-jie C., Hong J., Yun-Yang L. Antifungal antibiotic S1 produced by *Streptomyces castelarensis* FIM95-F1 // Natural Product Research and Development. 2011. V. 23. No. 5. P. 809–814.
34. Kumar Y., Goodfellow M. Five new members of the *Streptomyces violaceusniger* 16S rRNA gene clade: *Streptomyces castelarensis* sp. NOV., *Streptomyces himastatinicus* sp. NOV., *Streptomyces mordarskii* sp. NOV., *Streptomyces rapamycinicus* sp. NOV. and *Streptomyces ruanii* sp. NOV. // Int. J. Systematic Evol. Microbiol. 2008. V. 58. No. 6. P. 1369–1378.
35. Hatanaka T., Yoshiko Uesugi JA, Iwabuchi M. Purification, characterization cloning, and sequencing of metalloendopeptidase from *Streptomyces septatus* TH-2 // Archives of Biochemistry and Biophysics. 2005. V. 434. No. 2. P. 289–298.
36. Khushbo O., Kumar P., Dubey K.K., Usmani Z., Sharma M., Gupta V.K. Biotechnological and industrial applications of streptomyces metabolites // Biofuels, Bioproducts and Biorefining. 2021. No. 1. P. 244–264.
37. Marakasova K.S., Ostash B.O., Fedorenko V.O. Negative regulation of moenomycin a biosynthesis in *Streptomyces ghanaensis* ATCC14672 // Micrology and Biotechnology. 2009. V. 3. No. 7. P. 36–39.
38. Лапчинская О.А., Катруха Г.С., Погожева В.В., Филичева В.А., Харитоновна Л.А., Лапчинская М.Ю., Яковенко А.Н., Орлова Г.И., Куляева В.В., Пономаренко В.И., Тюрин А.П., Коршун В.А. Штамм *Streptomyces tendae* – продуцент противобактериального антибиотика ИНА 5812 // Патент RU 2710733. Заявление: 2019120387, 01.07.2019. Дата публикации: 10.01.2020. Бюлл. 1.
39. Sakdapetsiri C., Fukuta Y., Aramsirirujivet Y., Shirasaka N., Tokuyama S., Kitpreechavanich V. Solid state fermentation, storage and viability of *Streptomyces similanensis* 9X166 using agro-industrial substrates against *Phytophthora palmivora*: induced black rot disease in orchids // Biocontrol Science & Technology. 2019. V. 29. No. 3. P. 276–292.
40. Ayed A., Ben Slimene I., Chaouachi M., Mankai H., karkouch I., Djebali N., Elkahoui S., Tabbene O., Limam F., Kalai-Grami L. Antifungal activity of volatile organic compounds from *Streptomyces* sp. strain S97 against *Botrytis cinerea* // Biocontrol Science and Technology. 2021. V. 31. No. 12. P. 1330–1348.
41. Петухов Д.В., Товстик Е.В., Бакулина А.В., Сазанова М.Л., Бурков А.А. Почвенный штамм *Streptomyces* sp. 2K1: филогенетическое положение, влияние на рост гриба *Fusarium proliferatum* // Теоретическая и прикладная экология. 2020. № 2. С. 111–116.



42. Gopalakrishnan S., Pande S., Sharma M., Humayun P., Kiran B.K., Sandeep D., Rupela O. Evaluation of actinomycete isolates obtained from herbal vermicompost for the biological control of *Fusarium* wilt of chickpea // Crop. Prot. 2011. V. 30. No. 8. P. 1070–1078.
43. Shahid M., Singh B.N., Verma S., Choudhary P., Das S., Chakdar H., Murugan K., Goswami S.K., Saxena A.K. Bioactive antifungal metabolites produced by *Streptomyces amritsarensis* V31 help to control diverse phytopathogenic fungi // Brazilian Journal of Microbiology. 2021. V. 52. No. 4. P. 1687–1699.
44. Hamed J., Mohammadipناه F. Biotechnological application and taxonomical distribution of plant growth promoting actinobacteria // J. Industrial Microbiol. Biotechnol. 2015. V. 42. No. 2. P. 157–171.
45. Зенова Г.М., Лобакова Е.С., Широких И.Г., Иванова Е.А. Актиномицеты – ассоциативные компоненты цианобактериальных сообществ и симбиозов // Теоретическая и прикладная экология. 2013. № 2. С. 11–20.
46. Manucharova N.A., Kuteinikova Yu.V., Ivanov P.V., Nikolaeva S.K., Trofimov V.T., Stepanov P.Yu., Tyapkina E.V., Lipatov D.N., Stepanov A.L. Molecular analysis of the hydrolytic component of petroleum contaminated soils and of soils remediated with chitin // Microbiology. 2017. V. 68. No. 3. P. 395–402.
47. Domracheva L.I., Shirokikh I.G., Fokina A.I. Anti-fusarium activity of cyanobacteria and actinomycetes in soil and rhizosphere // Microbiology. 2010. V. 79. No. 6. P. 871–876.
48. Широких И.Г., Назарова Я.И., Бакулина А.В., Абубакирова Р.И. Новые штаммы стрептомицетов как перспективные биофунгициды // Теоретическая и прикладная экология. 2021. № 1. С. 172–180.
49. Закалюкина Ю.В., Зенова Г.М. Антагонистические свойства почвенных ацидофильных актиномицетов // Известия Российской академии наук. Серия биологическая. 2007. № 4. С. 402–405.
50. Pylro V.S., Dias A.F., Andreote C.F., Andreote F.D., Mello D.E., Varani A., Figueiredo D.E., Ribeiro I.A., Kitano I.T., Almeida D.E., Bernardo E.R. Draft genomic sequences of *Streptomyces misionensis* ACT66 and *Streptomyces albidoflavus* act77, bacteria with potential application for phytopathogen biocontrol // Microbiology Resource Announcements. 2019. V. 8. No. 36. P. 118–125.
51. Зайцева Т.Б., Сафронова В.И., Медведева Н.Г. *Streptomyces geldanamycininus* Z374 – новый штамм с биоцидной активностью в отношении цианобактерий // Теоретическая и прикладная экология. 2022. № 1. С. 159–166.
52. Cho J.Y., Kim M.S. Antibacterial benzaldehydes produced by seaweed-derived *Streptomyces atrovirens* PK288-21 // Fisheries Science. 2012. V. 78. No. 5. P. 1065–1073.
53. Efimenko T.A., Malanicheva I.A., Vasil'eva B.F., Glukhova A.A., Sumarukova I.G., Boikova Yu.V., Malkina N.D., Terekhova L.P., Efremenkova O.V. Antibiotic activity of bacterial endobionts of basidiomycete fruit bodies // Microbiology. 2016. V. 85. P. 740–747.
54. Даниленко В.Н. Штамм *Streptomyces avermitilis* НИЦБ 132 – продуцент авермектинов // Патент RU 2147320. Заявление: 99119946/13, 22.09.1999. Дата публикации: 10.04.2000. Бюлл. 20.
55. Мосин В.А., Кругляк Е.Б., Березкина Н.Е., Новик Т.С., Дриняев В.А. Штамм актиномицета *Streptomyces avermitilis* ССМ 4697 – продуцент авермектинов // Патент RU № 2156301. Заявление: 98110940/13, 09.06.1998. Дата публикации: 20.09.2000. Бюлл. 22.
56. Новикова И.И., Бойкова И.В. Штамм актиномицета *Streptomyces chrysomallus* P-21 для получения биопрепарата полифункционального действия // Патент RU № 2226214. Заявление: 2002117842/13, 02.07.2002. Дата публикации: 27.03.2004. Бюлл. 19.
57. Ермолова В.П., Самоукина Г.В., Гришечкина С.Д., Сафронова В.И., Оследкин Ю.С., Романова Т.А. Штамм *Streptomyces globisporus* K-35/15 в качестве средства для защиты растений от вредных насекомых – фитофагов // Патент RU № 2630661. Заявление: 2016145887, 22.11.2016. Дата публикации: 09.11.2017. Бюлл. 23.
58. Галкина Н.Н., Бесаева С.Г., Асланян Е.М., Лиховидов В.Е. Штамм актиномицета *Streptomyces hygrosopicus* Sub sp. ЦКМ В-4561, обладающий фунгицидными, бактерицидными и инсектицидными свойствами // Патент RU № 2243259. Заявление: 2002129235/13, 01.11.2002. Дата публикации: 27.12.2004. Бюлл. 18.
59. Белявская Л., Галаган Т., Болтовская Е., Козырицкая В., Валагурова Е., Сигарева Д., Иутинская Г. Антинематодные свойства *Streptomyces avermytilis* УКМ АС-2179 и его авермектинового комплекса – аверкома // Stiinta Agricola. 2009. № 1. С. 29–33.
60. Новикова И.И., Бойкова И.В., Шенин Ю.Д. Биологические особенности и компонентный состав активного комплекса штамма *Streptomyces chrysomallus* P-21 – антагониста фитопатогенных грибов // Вестник защиты растений. 2006. № 3. С. 13–21.
61. Law J.W.F., Ser H.L., Khan T.M., Chuah L.H., Pusparajah P., Chan K.G., Lee L.H. The potential of *Streptomyces* as biocontrol agents against the rice blast fungus, *Magnaporthe oryzae* (*Pyricularia oryzae*) // Front. Microbiol. 2017. V. 8. No. 3. P. 1–8.
62. Dernoeden P.H. Polyoxin D (Endorse) – a new fungicide for brown patch and large patch control, Turfax // The international newsletter about current developments in turf grass. 2001. V. 9. P. 6–7.
63. Owen D., Williams A.P., Griffith G.W., Withers P.J. Use of commercial bio-inoculants to increase agricultural production through improved phosphorous acquisition // Appl. Soil Ecol. 2015. V. 86. P. 41–54.
64. Широких И.Г., Лыскова И.В., Назарова Я.И., Градобоева Т.П., Боков Н.А., Абубакирова Р.И. Местные штаммы стрептомицетов в защите гороха (*Pisum*

*sativum* L.) от вредоносных инфекций // Теоретическая и прикладная экология. 2022. № 2. С. 173–182.

65. Рябова О.В. PGPR-свойства ризосферного изолята *Streptomyces* sp. A-4 // Таврический вестник аграрной науки. Симферополь. 2019. № 4 (20). С. 96–110.

66. Григорян Л.Н., Батаева Ю.В., Шляхов В.А., Держинская И.С. Штамм *Streptomyces carpaticus* для защиты от насекомых-вредителей, грибных, вирусных болезней и стимуляции роста томатов // Патент RU № 2695157. Заявление: 2018113688, 13.04.2018. Дата публикации: 22.07.2019. Бюл. № 21.

67. Григорян Л.Н., Батаева Ю.В., Шляхов В.А., Магзанова Д.К., Баймухамбетова А.С. Фитотоксичность и инсектоакарицидная активность актиномицетов, выделенных из засоленных почв аридной территории // Юг России: экология, развитие. 2020. Т. 15. № 2. С. 103–112.

68. Арзамасова Е.Г., Грипась М.Н., Попова Е.В. Влияние штамма *Streptomyces hygroscopicus* A-4 на корневую продуктивность и поражение корневыми гнилями клевера лугового // Владимирский земледелец. 2015. № 3–4 (73–74). С. 31–33.

69. Широких И.Г., Баталова Г.А., Рябова О.В., Русакова И.И. Эффекты интродукции *Streptomyces hygroscopicus* A4 в фитосферу голозерного овса // Зерновое хозяйство России. 2013. № 3. С. 52–56.

## References

1. Oren A., Garrity G.M. Valid publication of the names of forty-two phyla of prokaryotes // International Journal of Systematic and Evolutionary Microbiology. 2021. V. 5. No. 71 (10). P. 1–7. doi: 10.1099/ijsem.0.005056

2. Zvyagintsev D.G., Zenova G.M. Ecology of actinomycetes. Moskva: GEOS, 2001. 256 p. (in Russian).

3. Lysak V.V. Microbiology. Minsk: BGU, 2007. 426 p. (in Russian).

4. Bhatti A.A., Haq S., Bhat R.A. Actinomycetes benefaction role in soil and plant health // Microbial Pathogenesis. 2017. V. 111. P. 458–467. doi: 10.1016/j.micpath.2017.09.036

5. Chuluun B., Saparmyradov K.A., Alimova F.K., Mindubaev A.Z. Comparison of indicators of phytotoxicity, fungicidal and bactericidal activity of streptomycetes from different habitats // Butlerovskie soobshcheniya. 2014. V. 38. No. 6. P. 147–152 (in Russian).

6. Colombo E.M., Kunova A., Cortesi P., Saracchi M., Pasquali M. Critical assessment of *Streptomyces* spp. able to control toxigenic fusaria in cereals: A literature and patent review // International journal of molecular sciences. 2019. V. 20. No. 24. P. 6119–6127. doi: 10.3390/ijms20246119

7. Shirokikh I.G., Bakulina A.V., Nazarova Ya.I., Shirokikh A.A., Kozlova L.M. Influence of *Streptomyces castelarensis* A4 on the incidence and yield of grain crops in a field crop rotation // Mikologiya i fitopatologiya. 2020. V. 54. No. 1. P. 59–66 (in Russian). doi: 10.31857/S0026364820010080

8. Dmitrieva A.I., Alekseenko A.V., Belova D.D., Piskaeva N.I., Tereshchuk L.V. *Streptomyces* and *Bacillus* keratinases: properties and uses // Tekhnika i texnologiya pishhevykh proizvodstv. 2020. V. 50. No. 4. P. 602–615 (in Russian). doi: 10.21603/2074-9414-2020-4-602-615

9. Polyak Yu.M., Sukharevich V.I. Identification and regulation of antagonistic properties of soil actinomycete *Streptomyces* sp. 89 // Izvestiya Rossiyskoy akademii nauk. Seriya biologicheskaya. 2021. No. 5. P. 547–555 (in Russian). doi: 10.31857/S1026347021050127

10. Bataeva Yu.V., Grigoryan L.N., Kurashov E.A., Krylova Yu.V., Fedorova E.V., Yavid E.Ya., Khodonovich V.V., Yakovleva L.V. Study of metabolites of *Streptomyces carpaticus* RCAM04697 to create environmentally friendly plant protection products // Theoretical and Applied Ecology. 2021. No. 3. P. 172–178 (in Russian). doi: 10.25750/1995-4301-2021-3-172-178

11. Manucharova N.A., Ksenofontova N.A., Karimov T.D., Vlasova A.P., Zenova G.M., Stepanov A.L. Changes in the phylogenetic structure of the metabolically active prokaryotic complex of soils under the influence of oil pollution // Mikrobiologiya. 2020. V. 89. No. 2. P. 222–234 (in Russian). doi: 10.31857/S0026365620020093

12. Manucharova N.A., Kuteinikova Yu.V., Ivanov P.V., Nikolaeva S.K., Trofimov V.T., Stepanov P.Yu., Tyapkina E.V., Lipatov D.N., Stepanov A.L. Molecular analysis of the hydrolytic prokaryotic component of soils contaminated with oil products and restored by the application of chitin // Mikrobiologiya. 2017. V. 86. P. 373–382 (in Russian). doi: 10.7868/S0026365617030119

13. Nazarenko N.N. Adaptive reaction ranges of the complex of actinomycetes in urban soils // Agroekologicheskij Vestnik: Materialy mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferencii, posvyashhennoy godu ekologii v Rossii. 2017. P. 222–227 (in Russian).

14. Zenova G.M., Oborotov G.V., Norovsuren Zh., Fedotova A.V., Yakovleva L.V. Halophilic and alkaliphilic streptomycetes of saline soils // Pochvovedenie. 2007. No. 11. P. 1347–1351 (in Russian).

15. Zenova G.M., Manucharova N.A., Zvyagintsev D.G. Extremophilic and extremely tolerant actinomycetes in soils of different types // Pochvovedenie. 2011. No. 4. P. 457–478 (in Russian). doi: 10.19047/013616942019100159189

16. Zvyagintsev D.G., Zenova G.M., Oborotov G.V. Moderately haloalkaliphilic actinomycetes in salt-affected soils // Eurasian Soil Science. 2009. V. 42. No. 13. P. 1515–1520. doi: 10.1134/S1064229309130122

17. Selyanin V.V., Zenova G.M., Mozharova N.V., Zakalyukina Yu.V., Zvyagintsev D.G. Acidophilic and alkaliphilic actinomycetes in acidic, neutral and alkaline soils // Pochvovedenie. 2005. No. 5. P. 590–593 (in Russian).

18. Abushova A.R., Gasanova S.A., Kasimzade M.A. Ecological features of rare genera of actinomycetes in the soils of Azerbaijan // Vestnik Dnepropetrovskogo universiteta. Biologiya. 2010. V. 2. No. 1. P. 3–7 (in Russian).

19. Shirokikh I.G., Nazarova Ya.I., Shirokikh A.A., Ashikhmina T.Ya. Communities of actinomycetes in burzems of forest ecosystems with different types of climate // Theoretical and Applied Ecology. 2018. No. 1. P. 80–87 (in Russian). doi: 10.25750/1995-4301-2018-1-080-087
20. Grishko V.N., Syshchikova O.V. Structural and functional features of the actinomycete community in some chernozems and saline soils of Ukraine // Pochvovedenie. 2010. No. 2. P. 221–228 (in Russian).
21. Saadouli I., Marasco R., Mejri L., Hamden H., Guerfali M.M., Stathopoulou P., Daffonchio D., Cherif A., Ouzari H.I., Tsiamis G., Mosbah A. Diversity and adaptation properties of actinobacteria associated with Tunisian stone ruins // Front Microbiol. 2022. No. 13. P. 832–997. doi: 10.3389/fmicb.2022.997832
22. Bazilbekov B.M., Doolotkeldieva T.D. Optimization of the composition of nutrient media and technical indicators of obtaining an inoculum for the production of a bioproduct based on *Streptomyces* bacteria // Nauka, novye tekhnologii i innovacii Kyrgyzstana. 2021. No. 4. P. 94–98 (in Russian). doi: 10.26104/NNTIK.2019.45.557
23. Waksman S.A., Schatz A., Reynolds D.M. Production of antibiotic substances by actinomycetes // Annals of the New York Academy of Sciences. 2010. V. 1213. No. 1. P. 112–124. doi: 10.1111/j.1749-6632.2010.05861.x
24. Rudakova N.N., Alekseeva M.G., Danilenko V.N. Genes of aminoglycoside phosphotransferases in soil bacteria of the genus *Streptomyces* // Uspekhi sovremennoy biologii. 2020. V. 140. No. 3. P. 211–224 (in Russian). doi: 10.31857/S0042132420020064
25. Wang B., Knox H.L., Zhou S., Blaesi E.J., Krebs C., Wang R.X., Booker S.J., Blaszczyk A.J. Stereochemical and mechanistic investigation of the reaction catalyzed by from *Streptomyces fradiae*, a cobalamin-dependent radical s-adenosylmethionine methylase // Biochemistry. 2018. No. 57. No. 33. P. 4972–4984. doi: 10.1021/acs.biochem.8b00693
26. Bennura T., Ravikumara A., Zinjardea S., Javdekar V. *Nocardiosis* species: incidence, ecological roles and adaptations // Microbiological Research. 2015. No. 174. P. 33–47. doi: 10.1016/j.micres.2015.03.010
27. Naumova I.B., Tul'skaya E.M., Streshinskaya G.M., Kozlova Y.I., Potekhina N.V., Shashkov A.S., Evtushenko L.I., Stackebrandt E. Cell wall teichoic acids: structural diversity, species specificity in the genus *Nocardiosis*, and chemotaxonomic perspective // FEMS Microbiology Reviews. 2001. V. 25. No. 3. P. 269–284. doi: 10.1111/j.1574-6976.2001.tb00578.x
28. Princeva A.A., Sharova N.Yu., Vybornova T.V. Effect of low storage temperature on pigment formation of actinomycete strains *Streptomyces lucensis* and *Streptomyces violaceus* // Evraziyskoe Nauchnoe Obedinenie. 2018. No. 12–3 (46). P. 160–162 (in Russian).
29. Burtseva S.A., Byrsa M.N., Chebotar V.I., Shibaeva I.I., Shibaev A.Yu., Sidorenko A.S. Effect of a magnetic field on biomass accumulation and lipid content in *Streptomyces canosus* CNMN-AC-02 cultivated on a liquid medium // Himicheskaya fizika i mezoskopiya. 2020. V. 22. No. 3. P. 289–298 (in Russian). doi: 10.15350/17270529.2020.3.28
30. El-Badry M.T., Abdel-Fatah Y., Ibrahim I.A., Abdel-Halim S., Sharada H. Role of *Actinomyces* sp. in bio-extraction of copper from electronic waste // Biointerface Research in Applied Chemistry. 2022. V. 12. No. 5. P. 6723–6740. doi: 10.33263/BRIAC125.67236740
31. Poshekhontseva V.Yu., Fokina V.V., Tarlachkov S.V., Machulin A.V., Shutov A.A., Donova M.V. *Streptomyces tsukubensis* VKM Ac-2618D is an effective tacrolimus producer // Biotekhnologiya. 2021. No. 1 (37). P. 26–36 (in Russian). doi: 10.21519/0234-2758-2021-37-1-26-36
32. Brovko O.S., Zhiltsov D.V., Ivakhnov A.D., Bogdanov M.V. *Streptomyces avermitilis*: composition, properties // Himiya rastitelnogo syrya. 2020. No. 1. P. 57–66 (in Russian). doi: 10.14258/jcprm.2020015500
33. Fei P., Yang X., Lu-jie C., Hong J., Yun-Yang L. Antifungal antibiotic S1 produced by *Streptomyces castelarensis* FIM95-F1 // Natural product research and development. 2011. V. 23. No. 5. P. 809–814.
34. Kumar Y., Goodfellow M. Five new members of the *Streptomyces violaceusniger* 16S rRNA gene clade: *Streptomyces castelarensis* sp. NOV., comb. nov., *Streptomyces himastatinicus* sp. NOV., *Streptomyces mordarskii* sp. NOV., *Streptomyces rapamycinicus* sp. NOV. and *Streptomyces ruanii* sp. NOV. // Int. J. Systematic Evol. Microbiol. 2008. V. 58. No. 6. P. 1369–1378. doi: 10.1099/ijs.0.65408-0
35. Hatanaka T., Yoshiko Uesugi JA, Iwabuchi M. Purification, characterization cloning, and sequencing of metalloendopeptidase from *Streptomyces septatus* TH-2 // Archives of Biochemistry and Biophysics. 2005. V. 434. No. 2. P. 289–298. doi: 10.1016/j.abb.2004.11.018
36. Khushbo O., Kumar P., Dubey K.K., Usmani Z., Sharma M., Gupta V.K. Biotechnological and industrial applications of *Streptomyces* metabolites // Biofuels, Bioproducts and Biorefining. 2021. No. 1. P. 244–264. doi: 10.1002/bbb.2294
37. Marakasova K.S., Ostash B.O., Fedorenko V.O. Negative regulation of moenomycin a biosynthesis in *Streptomyces ghanaensis* ATCC14672 // Micrology and Biotechnology. 2009. V. 3. No. 7. P. 36–39. doi: 10.3390/microorganisms9020284
38. Lapchinskaya O.A., Katrukha G.S., Pogozheva V.V., Filicheva V.A., Kharitonova L.A., Lapchinskaya M.Yu., Yakovenko A.N., Orlova G.I., Kulyaeva V.V., Ponomarenko V.I., Tyurin A.P., Korshun V.A. Strain *Streptomyces tendae* – producer of antibacterial antibiotic INA 5812 // Patent RU 2710733. Application: 2019120387, 01.07.2019. Date of publication: 10.01.2020. Bull. 1 (in Russian).
39. Sakdapetsiri C., Fukuta Y., Aramsirirujwet Y., Shirasaka N., Tokuyama S., Kitpreechavanich V. Solid state fermentation, storage and viability of *Streptomyces similanensis* 9X166 using agro-industrial substrates against *Phytophthora palmivora*: induced black rot disease

- in orchids // *Biocontrol Science & Technology*. 2019. V. 29. No. 3. P. 276–292. doi: 10.1080/09583157.2018.1553027
40. Ayed A., Ben Slimene I., Chaouachi M., Mankai H., Karkouch I., Djebali N., Elkahoui S., Tabbene O., Limmam F., Kalai-Grami L. Antifungal activity of volatile organic compounds from *Streptomyces* sp. strain S97 against *Botrytis cinerea* // *Biocontrol Science and Technology*. 2021. V. 31. No. 12. P. 1330–1348. doi: 10.1080/09583157.2021.1947982
41. Petukhov D.V., Tovstik E.V., Bakulina A.V., Sazanova M.L., Burkov A.A. Soil *Streptomyces* sp. strain 2K1: phylogenetic position, effect on *Fusarium proliferatum* growth // *Theoretical and Applied Ecology*. 2020. No. 2. P. 111–116. doi: 10.25750/1995-4301-2020-2-111-116
42. Gopalakrishnan S., Pande S., Sharma M., Humayun P., Kiran B.K., Sandeep D., Rupela O. Evaluation of actinomycete isolates obtained from herbal vermicompost for the biological control of *Fusarium* wilt of chickpea // *Crop. Prot.* 2011. V. 30. No. 8. P. 1070–1078. doi: 10.1016/j.cropro.2011.03.006
43. Shahid M., Singh B.N., Verma S., Choudhary P., Das S., Chakdar H., Murugan K., Goswami S.K., Saxena A.K. Bioactive antifungal metabolites produced by *Streptomyces amritsarensis* V31 help to control diverse phytopathogenic fungi // *Brazilian Journal of Microbiology*. 2021. V. 52. No. 4. P. 1687–1699. doi: 10.1007/s42770-021-00625-w
44. Hamed J., Mohammadipناه F. Biotechnological application and taxonomical distribution of plant growth promoting actinobacteria // *J. Industrial Microbiol. Biotechnol.* 2015. V. 42. No. 2. P. 157–171. doi: 10.1007/s10295-014-1537-x
45. Zenova G.M., Lobakova E.S., Shirokikh I.G., Ivanova E.A. Actinomycetes as associative components of cyanobacterial communities and symbioses // *Theoretical and Applied Ecology*. 2013. No. 2. P. 11–20 (in Russian). doi: 10.25750/1995-4301-2013-2-011-020
46. Manucharova N.A., Kuteinikova Yu.V., Ivanov P.V., Nikolaeva S.K., Trofimov V.T., Stepanov P.Yu., Tyapkina E.V., Lipatov D.N., Stepanov A.L. Molecular analysis of the hydrolytic component of petroleum contaminated soils and of soils remediated with chitin // *Microbiology*. 2017. V. 68. No. 3. P. 395–402. doi: 10.1134/S0026261717030092
47. Domracheva L.I., Shirokikh I.G., Fokina A.I. Anti-fusarium activity of cyanobacteria and actinomycetes in soil and rhizosphere // *Microbiology*. 2010. V. 79. No. 6. P. 871–876. doi: 10.25750/1995-4301-2022-2-006-014
48. Shirokikh I.G., Nazarova Ya.I., Bakulina A.V., Abubakirova R.I. New strains of streptomycetes as promising biofungicides // *Theoretical and Applied Ecology*. 2021. No. 1. P. 172–180 (in Russian). doi: 10.25750/1995-4301-2022-1-117-180
49. Zakalyukina Yu.V., Zenova G.M. Antagonistic properties of soil acidophilic actinomycetes // *Izvestiya Rossiyskoy akademii nauk. Seriya biologicheskaya*. 2007. No. 4. P. 402–405 (in Russian).
50. Pylro V.S., Dias A.F., Andreote C.F., Andreote F.D., Mello D.E., Varani A., Figueiredo D.E., Ribeiro I.A., Kitano I.T., Almeida D.E., Bernardo E.R. Draft genomic sequences of *Streptomyces misionensis* ACT66 and *Streptomyces albidoflavus* ACT77, bacteria with potential application for phytopathogen biocontrol // *Microbiology Resource Announcements*. 2019. V. 8. No. 36. P. 118–125. doi: 10.1128/MRA.0094919
51. Zaitseva T.B., Safronova V.I., Medvedeva N.G. *Streptomyces geldanamycininus* Z374 – a new strain with biocidal activity against cyanobacteria // *Theoretical and Applied Ecology*. 2022. No. 1. P. 159–166 (in Russian). doi: 10.25750/1995-4301-2022-1-159-166
52. Cho J.Y., Kim M.S. Antibacterial benzaldehydes produced by seaweed-derived *Streptomyces atrovirens* PK288-21 // *Fisheries Science*. 2012. V. 78. No. 5. P. 1065–1073. doi: 10.1007/s12562-012-0531-3
53. Efimenko T.A., Malanicheva I.A., Vasil'eva B.F., Glukhova A.A., Sumarukova I.G., Boikova Yu.V., Malkina N.D., Terekhova L.P., Efremenkova O.V. Antibiotic activity of bacterial endobionts of basidiomycete fruit bodies // *Microbiology*. 2016. V. 85. P. 740–747. doi: 10.7868/S0026365616060082
54. Danilenko V.N. Strain *Streptomyces avermitilis* NICB 132 – producer of avermectins // Patent RU 2147320. Application: 99119946/13, 22.09.1999. Date of publication 10.04.2000. Bull. 20 (in Russian).
55. Mosin V.A., Kruglyak E.B., Berezkina N.E., Novik T.S., Drinyayev V.A. Actinomycete strain *Streptomyces avermitilis* CCM 4697 – producer of avermectins // Patent RU No. 2156301. Application: 98110940/13, 09.06.1998. Date of publication: 20.09.2000. Bull. 22 (in Russian).
56. Novikova I.I., Boikova I.V. Strain of actinomycete *Streptomyces chrysomallus* P-21 for obtaining a biological product of polyfunctional action // Patent RU No. 2226214. Application: 2002117842/13, 02.07.2002. Date of publication: 27.03.2004. Bull. 19 (in Russian).
57. Ermolova V.P., Samoukina G.V., Grishechkina S.D., Safronova V.I., Osledkin Yu.S., Romanova T.A. Strain *Streptomyces globisporus* K-35/15 as a means for protecting plants from harmful insects – phytophages // Patent RU No. 2630661. Application: 2016145887, 22.11.2016. Date of publication: 09.11.2017. Bull. 23 (in Russian).
58. Galkina N.N., Besaeva S.G., Aslanyan E.M., Likhovidov E.V. Strain of actinomycete *Streptomyces avermitilis* CCM 4697 – producer of avermectins // Patent RU No. 2156301. Application: 2002129235/13, 01.11.2002. Date of publication: 27.12.2004. Bull. 22 (in Russian).
59. Belyavskaya L., Galagan T., Boltovskaya E., Kozyrtskaya V., Valagurova E., Sigareva D., Iutinskaya G. Antinematode properties of *Streptomyces avermytilis* UKM AS-2179 and its avermectin complex – avercom // *Stiinta Agricola*. 2009. No. 1. P. 29–33 (in Russian).
60. Novikova I.I., Boikova I.V., Shenin Yu.D. Biological features and component composition of the active complex of the *Streptomyces chrysomallus* P-21 strain, an

antagonist of phytopathogenic fungi // Vestnik zashhity rasteniy. 2006. No. 3. P. 13–21 (in Russian).

61. Law J.W.F., Ser H.L., Khan T.M., Chuah L.H., Pusparajah P., Chan K.G., Lee L.H. The potential of *Streptomyces* as biocontrol agents against the rice blast fungus, *Magnaporthe oryzae* (*Pyricularia oryzae*) // Front. Microbiol. 2017. V. 8. No. 3. P. 1–8. doi: 10.3389/fmicb.2017.00003

62. Dernoeden P.H. Polyoxin D (Endorse) – a new fungicide for brown patch and large patch control, Turfax // The international newsletter about current developments in turf grass. 2001. V. 9. P. 6–7.

63. Owen D., Williams A.P., Griffith G.W., Withers P.J. Use of commercial bio-inoculants to increase agricultural production through improved phosphorous acquisition // Appl. Soil Ecol. 2015. V. 86. P. 41–54. doi: 10.1016/j.apsoil.2014.09.012

64. Shirokikh I.G., Lyskova I.V., Nazarova Ya.I., Gradoboeva T.P., Bokov N.A., Abubakirova R.I. Local strains of streptomycetes in the protection of peas (*Pisum sativum* L.) from harmful infections // Theoretical and Applied Ecology. 2022. No. 2. P. 173–182 (in Russian). doi: 10.25750/1995-4301-2022-2-173-182

65. Ryabova O.V. PGPR properties of the rhizosphere isolate *Streptomyces* sp. A-4 // Tavricheskiy vestnik agrar-

noy nauki. 2019. No. 4 (20). P. 96–110 (in Russian). doi: 10.33952/2542-0720-2019-4-20-96-110

66. Grigoryan L.N., Bataeva Yu.V., Shlyakhov V.A., Dzerzhinskaya I.S. *Streptomyces carpaticus* strain for protection against insect pests, fungal, viral diseases and stimulation of tomato growth // Patent RU No. 2695157. Application: 2018113688, 13.04.2018. Date of publication: 22.07.2019. Bull. 21 (in Russian).

67. Grigoryan L.N., Bataeva Yu.V., Shlyakhov V.A., Magzanova D.K., Baimukhambetova A.S. Phytotoxicity and insectoacaricidal activity of actinomycetes isolated from saline soils of arid territory // South of Russia: ecology, development. 2020. V. 15. No. 2. P. 103–112 (in Russian). doi: 10.18470/1992-1098-2020-2-103-112

68. Arzamasova E.G., Gripas M.N., Popova E.V. Influence of *Streptomyces hygroscopicus* A-4 strain on fodder productivity and damage by red clover by root rots // Vladimirskiy zemledec. 2015. No. 3–4 (73–74). P. 31–33 (in Russian).

69. Shirokikh I.G., Batalova G.A., Ryabova O.V., Rusakova I.I. Effects of the introduction of *Streptomices hygroscopicus* A4 into the phytosphere of naked oats // Zernovoe khozyaystvo Rossii. 2013. No. 3. P. 52–56 (in Russian).

**Экологические факторы, определяющие  
естественную и антропогенную инвазию борщевика Сосновского  
*Heracleum sosnowskyi* Manden., меры борьбы с ним (обзор)**

© 2023. Т. Я. Ашихмина<sup>1,2</sup>, д. т. н., профессор, г. н. с., зав. лабораторией,  
Е. В. Товстик<sup>1</sup>, к. б. н., доцент, с. н. с.,  
Т. А. Адамович<sup>1</sup>, к. г. н., доцент,

<sup>1</sup>Вятский государственный университет,

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

<sup>2</sup>Институт биологии Коми научного центра Уральского отделения  
Российской академии наук,

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

e-mail: tovstik2006@inbox.ru

В настоящем обзоре проанализирована и рассмотрена на конкретных примерах проблема инвазии борщевика Сосновского *Heracleum sosnowskyi* Manden. под влиянием различных экологических факторов: абиотических, биотических и антропогенных. Установлено, что среди абиотических факторов главную роль в распространении борщевика Сосновского играют температура, влажность, свет, скорость и направление ветра, длительность залегания и высота снежного покрова, рельеф местности, элементный состав почвы. Совокупность абиотических факторов в целом определяет приуроченность борщевика Сосновского к областям прохладного гумидного климата. Повышенная влажность, наличие снежного покрова, низкие положительные температуры в осенне-зимний и ранневесенний периоды создают условия для стратификации семян, обеспечивающей жизнеспособность борщевика. Различные межвидовые взаимодействия, наряду с другими экологическими факторами, вносят значительный вклад в инвазивность борщевика Сосновского. Определяющим биотическим фактором в случае данного вида выступает конкуренция за ресурсы. Однако, несмотря на аллелопатическую активность борщевика, он может являться объектом паразитарного внедрения некоторых растительных видов, к примеру, лианы колючеягодника лопастного *Echinocystis lobata* (Michx.) Torr. & A. Gray. Внедрение борщевика Сосновского в естественные фитоценозы зависит от их плотности, оно также тесно связано с опылителями и фитофагами. Отмечается связь растения с почвенными микробными сообществами, которые оказывают на инвазию борщевика как положительное, так и отрицательное действие. Среди антропогенных факторов наибольший вклад в инвазивность борщевика Сосновского вносит перемещение засорённых жизнеспособными семенами данного растения грунтов в ходе строительства, перенос семян с различными видами транспорта. Значимую роль в инвазивности борщевика Сосновского играет вырубка лесов, в ходе которой происходит изменение структуры и состава растительности. Распространение борщевика обусловлено не только экологическими факторами, действующими в комплексе, но и его высокой адаптивностью к различным условиям среды обитания. В связи с этим для определения способа борьбы с борщевиком Сосновского важно учитывать не только эффективность мер, но и роль экологических факторов, определяющих жизнеспособность данного растения.

**Ключевые слова:** биотические, абиотические, антропогенные факторы, интродукция, инвазия, меры борьбы.

**Ecological factors determining natural and anthropogenic invasion  
of *Heracleum sosnowskyi* Manden., measures to combat it (review)**

© 2023. Т. Я. Ashikhmina<sup>1,2</sup> ORCID: 0000-0003-4919-0047

E. V. Tovstik<sup>1</sup> ORCID: 0000-0003-1861-6076

T. A. Adamovich<sup>1</sup> ORCID: 0000-0002-8684-927X

<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, Russia, 167982,

e-mail: tovstik2006@inbox.ru

This review analyzes the problem of invasion of *Heracleum sosnowskyi* Manden. under the influence of various environmental factors. Particular attention is paid to abiotic, biotic and anthropogenic factors. The influence of these factors on invasiveness is considered on specific examples. It has been established that among abiotic factors, temperature, humidity, light, wind speed and direction, duration and depth of snow cover, terrain, and elemental composition of the soil play the main role in the distribution of *H. sosnowskyi*. The totality of abiotic factors generally determines the confinement of *H. sosnowskyi* to areas of a cool humid climate. Increased humidity, the presence of snow cover, low positive temperatures in the autumn-winter and early spring periods create conditions for seed stratification, which ensures the viability of hogweed. Various interspecific interactions, along with other environmental factors, make a significant contribution to the invasiveness of *H. sosnowskyi*. The determining biotic factor in the case of this species is competition for resources. However, despite the allelopathic activity of hogweed, it can be the object of parasitic invasion of some plant species, for example, vines of *Echinocystis lobata* (Michx.) Torr. & A. Gray. The introduction of *H. sosnowskyi* into natural phytocenoses depends on their density, it is also closely related to pollinators and phytophages. The connection of the plant with soil microbial communities is noted, which have both positive and negative effects on the invasion of *H. sosnowskyi*. Among anthropogenic factors, the greatest contribution to the invasiveness of *H. sosnowskyi* is made by the movement of soils contaminated with viable seeds of this plant during construction, the transfer of seeds with various modes of transport. Deforestation plays a significant role in the invasiveness of *H. sosnowskyi*, during which the structure and composition of vegetation changes. The distribution of hogweed is due not only to environmental factors acting in combination, but also to its high adaptability to various environmental conditions. In this regard, in order to determine the method of combating *H. sosnowskyi*, it is important to take into account not only the effectiveness of measures, but also the role of environmental factors that determine the viability of this plant.

**Keywords:** biotic, abiotic, anthropogenic factors, introduction, invasion, control measures.

В современных условиях к наиболее значимым причинам ускоренной сукцессии относятся выведение земель из сельскохозяйственного использования, а также интродукцию видов в новую среду. Негативным последствием интродукции является инвазия. Она приводит к снижению биоразнообразия экосистем, вплоть до их полного разрушения. Скорость данного процесса определяется комплексом действующих экологических факторов [1].

Среди инвазивных видов растений, встречающихся на территории Российской Федерации (РФ), наибольшую озабоченность в связи с агрессивными свойствами и быстрыми темпами распространения вызывает борщевик Сосновского (*Heracleum sosnowskyi* Manden.) [2]. Это крупное травянистое растение из семейства Ариáceае (сельдерейные) было введено в культуру, как кормовое. Впоследствии не нашедшее широкого применения, при отсутствии надлежащего контроля, оно стало активно занимать территории, приуроченные к землям сельскохозяйственного и лесного назначения, обочинам дорог, территориям населённых пунктов [3–5].

Инвазия борщевика Сосновского в настоящее время является частью глобальных природных изменений, она способна вызывать существенные потери биологического разнообразия, наносит значительный экономический ущерб и представляет опасность для здоровья людей. В настоящее время особенно остро складывается ситуация в регионах, являвшихся в прошлом центрами его возделывания [6]. Кроме того, в условиях синергетических эффектов глобального изменения окружающей среды всё чаще отмечается на-

личие борщевика Сосновского на территориях, где ранее не происходила его преднамеренная интродукция [7, 8].

Последние достижения в разработке методов борьбы с борщевиком Сосновского позволили установить ряд эффективных средств. Однако применение их в крупных масштабах зачастую является трудоёмким процессом, требующим больших экономических затрат. В сложившихся условиях возрос интерес к роли экологических факторов, определяющих жизнеспособность борщевика Сосновского, с целью разработки мер по остановке и недопущению его распространения.

Цель работы – систематизация информации о факторах, влияющих на инвазию борщевика Сосновского и мерах борьбы с ним.

Исследование направлено на выявление роли различных экологических факторов в инвазивности борщевика Сосновского. Важность рассмотрения абиотических факторов определяется тем, что они являются основными условиями существования растительных видов. Биотические факторы играют важную роль в межвидовых взаимодействиях. Серьёзные последствия для экосистем имеют антропогенные факторы (рис.).

### Объекты и методы исследования

Объектом литературного обзора явился анализ особенностей распространения борщевика Сосновского под влиянием различных экологических факторов с целью выявления эффективных мер по борьбе с данной инвазией. Научные публикации для систематического обзора были отобраны путём запроса в научную

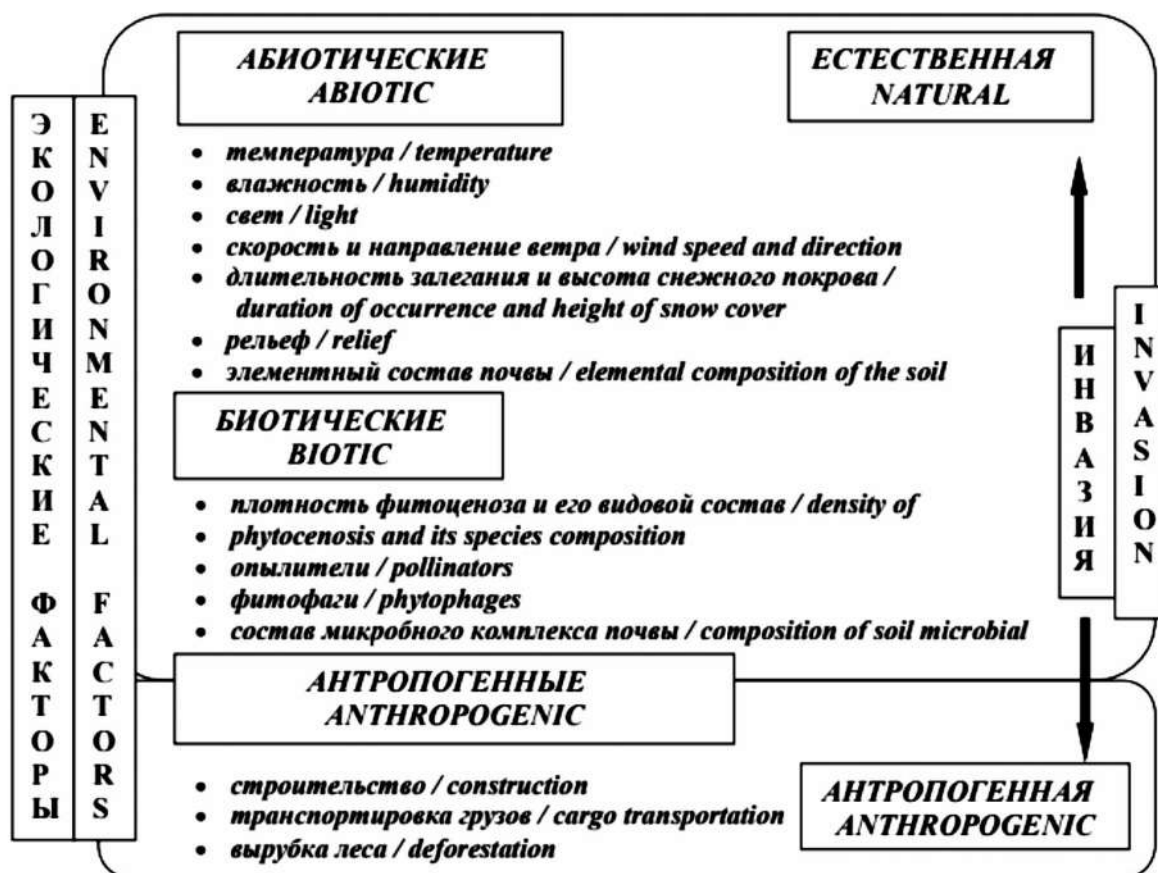


Рис. Факторы, определяющие инвазивность борщевика Сосновского  
 Fig. Factors determining the invasiveness of *Heracleum sosnowskyi*

электронную библиотеку e-LIBRARY.RU, КиберЛенинка, поисковую систему по научным публикациям Академия Google. Поиск патентов проводили в Информационно-поисковой системе Федерального института промышленной собственности. Для систематизации информации использовали литературные источники за период с 2013 по 2023 гг. Критерием отбора источников для систематизации информации в настоящем обзоре служили ключевые слова: борщевик Сосновского; инвазия; интродукция; экологические, абиотические, биотические факторы; сукцессия; конкуренция, консортивные связи; меры борьбы.

### Роль абиотических факторов в инвазивности борщевика Сосновского

Существенное влияние на инвазивность растительных видов, в том числе борщевика Сосновского, оказывают абиотические факторы. К ним относят доступность света, воды, питательных веществ и др.

Установлено, что климатические условия, в которых встречается борщевик Сосновско-

го, сильно варьируют в зависимости от его местопроизрастания. Исторической родиной борщевика Сосновского является восточная часть Большого Кавказа, Восточное и Юго-Восточное Закавказье, северо-восток Турции. Данные территории расположены в зоне субтропического и умеренного климатического поясов.

Вторичный ареал борщевика Сосновского приурочен преимущественно к областям прохладного гумидного климата [7]. Согласно карте современного распространения борщевика Сосновского на территории России, формирование его вторичных ареалов ограничивается зоной северной тайги (линия Онега – Сыктывкар). Инвазионный потенциал растения возрастает в зоне средней тайги, достигая пика в зоне смешанных лесов. Южная граница ареала располагается на линии Чернигов – Брянск – Калуга – Киров. В зоне лесостепи для выращивания *H. sosnowskyi* требуется орошение, в связи с чем инвайдер приурочен к долинам рек и ручьёв, к окраинам лесных массивов, где почвы отличаются большей влажностью [9].



В более сухих условиях континентальной южной тайги и лесостепи отмечается приуроченность борщевика Сосновского к пониженным элементам рельефа. В этих условиях он быстро реализует потенциал высокой продуктивности при оптимальной обеспеченности ресурсами, и плохо приспособлен поддерживать высокую физиологическую активность при неблагоприятных почвенных условиях [7].

Гидрохорное распространение семян борщевика Сосновского, регистрируемое в условиях северных территорий, обусловлено наличием генеративных особей, контактирующих с водой рек, и существованием по берегам рек открытых нарушенных участков почвы для успешного прорастания семян борщевика с последующим развитием растений [10].

Наличие снежного покрова является важным условием инвазивности борщевика. Более надёжная теплоизоляция для зимующих растений борщевика складывается в мелколиственных лесах, кроны деревьев в которых, по сравнению с хвойными лесами, не способны осаждать на себя большое количество снега, вследствие чего он скапливается на поверхности земли [11].

Весной скорость роста почек борщевика Сосновского экспоненциально увеличивается при температуре 5–30 °С, а осенью – при 2–5 °С. Доля тепловыделения энергии у проростков при температуре 2–5 °С составляет около 20%. В осенне-зимний и ранневесенний периоды зародыш увеличивается в размерах в 3–4 раза, а его вес – в 30–40 раз, что демонстрирует эффективность накопления энергии в молодых тканях и соответствует температурному режиму почвы на глубине размещения почек в ранневесенний, осенний и зимний периоды [12, 13].

В условиях вторичного ареала борщевик Сосновского предпочитает освещённые места, например, опушки леса [14]. Однако, согласно последним данным, светолюбивый борщевик Сосновского начал осваивать и нижний ярус пойменных лесов [15].

Крайне благоприятно на инвазивности борщевика сказывается наличие ветра [16]. В связи с этим в мелколиственных лесах, по сравнению с хвойными, где меньше ветра, создаются более благоприятные условия для успешного распространения данного вида [11].

Немаловажную роль в инвазивности борщевика Сосновского играет элементный состав почвы. В пользу данного заключения говорит факт чаще встречающихся инвазий в условиях

большей доступности питательных веществ в почве [17]. Установлено, что растение практически не накапливает мышьяк, даже в случае, когда его содержание в почве превышает ПДК. Аналогичная ситуация складывается с хромом, железом и марганцем. Содержание этих металлов в борщевике постоянное и низкое. В то же время борщевик Сосновского активно накапливает бор, молибден, литий, кальций, сурьму и некоторые другие элементы, относящиеся к группам энергичного и сильного поглощения. По отношению к натрию этот вид проявляет выраженные индикаторные свойства, отражая уровень концентрации элемента в почве [18]. Установлено, что корни борщевика накапливают тяжёлые металлы в большей степени, чем надземные органы. По интенсивности биологического поглощения кадмий, свинец и никель относятся к элементам сильного поглощения и аккумулируются преимущественно в корнях растений борщевика. Медь и цинк входят в группу элементов энергичного поглощения и в наибольшей степени аккумулируются в надземных органах: стеблях и семенах растений борщевика [19]. По сравнению с разнотравными луговыми сообществами в почве под моносообществами борщевика отмечается более высокое содержание ионов легкорастворимых в воде соединений, а в условиях повышенной кислотности – более низкое содержание органического вещества в почве [20].

### Роль биотических факторов в инвазивности борщевика Сосновского

Известно, что для успешной конкуренции в биоценозах растения используют различные механизмы. Одним из способов подавления конкурентов борщевиком Сосновского в процессе «захвата» территорий является мощное развитие листовой поверхности и практически полное перекрытие доступа света на поверхность почвы другим растениям. Однако на стадии зрелых семян борщевик Сосновского может быть уязвим. Эффект аннергии борщевика при этом связывают с активной выработкой фуранокумаринов в семенах и снижением их содержания в стеблях и листьях. В результате аллелопатическая активность борщевика снижается, в связи с чем он становится объектом паразитарного внедрения растительных видов, например, лиан колючеплодника лопастного *Echinocystis lobata* (Michx.) Torr. & A. Gray [21].

Плотный стеблестой и войлок засохшей травянисто-бурьянистой растительности является ограничивающим фактором для распространения борщевика [1]. Так, в условиях неповреждённой дернины в луговых сообществах молодые растения борщевика практически не встречаются [4, 22].

Процесс внедрения борщевика Сосновского в природные сообщества неразрывно связан с его взаимодействием с местной биотой. Одной из важнейших связей при этом является взаимодействие с опылителями и фитофагами [4]. В ходе исследования видового состава беспозвоночных фитофагов борщевика Сосновского в Республике Коми установлено незначительное различие в повреждаемости борщевика в зависимости от условий среды. Отмечается, что жизненный цикл фитофагов в ряде случаев отстаёт от фаз цветения и формирования семян, что значительно снижает регуляторную роль отмеченных беспозвоночных на численность и распространение борщевика Сосновского [23]. При исследовании насекомых, связанных с борщевиком, на территории Брянской области на цветах борщевика Сосновского было собрано 10 видов насекомых. Среди консортов идентифицированы клоп щавелевый (*Coreus marginatus*), клоп итальянский (*Graphosoma lineatum*), мохнатка обыкновенная (*Lagria hirta*), мягкотелка зонтичная (*Rhagonycha fulva*), семиточечная коровка (*Coccinella septempunctata*), ежемуха дождевых червей (*Pollenia rudis*), синяя муха красноголовая (*Calliphora erythrocephala*), оса французская (*Polistes gallicus*), чёрный садовый муравей (*Lasius niger*), муха принавозница (*Hylemyia* sp.) [4]. В ходе сравнительной оценки состава двукрылых насекомых, посещающих цветущие растения дудника лесного и борщевика Сосновского, произрастающих в непосредственной близости друг от друга, было выявлено, что не все двукрылые, типичные для аборигенного вида, способны использовать инвазионный вид [24]. Относительно небольшое число работ посвящено изучению консортивных связей борщевика Сосновского с насекомыми опылителями. Отмечается большее видовое разнообразие насекомых на соцветиях борщевика по сравнению с другими зонтичными растениями (*Seseli libanotis*). Это говорит о том, что борщевик Сосновского, за последние десятилетия активно внедрившийся в естественные сообщества Центральной России, способен эффективно конкурировать с местными видами зонтичных за привлечение насекомых-опылителей [25].

Как и любое растение, борщевик Сосновского вступает в тесную связь с почвенным микробным сообществом. В ходе исследования динамики заселения прикорневой зоны борщевика микроскопическими грибами и актиномицетами в процессе развития его проростков было установлено значимое участие мицелиальных бактерий в противодействии вторжению в ризосферу и ризоплану борщевика микроскопических грибов, среди которых много патогенных видов. Сделано предположение о том, что высокая инвазивность *H. sosnowskyi* может быть связана с высокой представленностью в ризосфере и ризоплане актиномицетов, для которых характерна антифунгальная активность [26].

При изучении влияния *H. sosnowskyi* на фототрофные микроорганизмы дерново-подзолистой почвы в почве под борщевиком было выявлено 25 видов микрофототрофов, на разнотравно-злаковом участке – 22. Коэффициент Жаккара сравниваемых участков был равен 42%. При этом установлено, что реакция микрофототрофов на *H. sosnowskyi* проявляется на видовом уровне [27].

В ходе исследования круглогодичной динамики численности и таксономического состава дрожжевых сообществ в дерново-подзолистых почвах под инвазивными зарослями борщевика Сосновского установлено, что они имеют существенные отличия от аборигенных дрожжевых сообществ под соседней луговой растительностью. В почвах обоих биотопов доминируют типичные эврибионтные виды дрожжей, при этом в почве под борщевиком доля аскомицетовых видов *Candida vartiovaarae* и *Wickerhamomyces anomalus* значительно меньше, а дрожжеподобных грибов, обладающих высокой гидролитической активностью, таких как *Trichosporon moniliiforme* и *T. porosum* – больше. Выявленные особенности объясняются тем, что в отличие от большинства аборигенных луговых трав борщевик не зимует с зелёными листьями, не происходит их постепенного отмирания с формированием полуразложившихся растительных остатков – основного источника питательных веществ для почвенно-подстилочного микробного комплекса. Кроме того, под борщевиком почти не развиваются травы нижнего яруса из-за сильного затенения и аллелопатического воздействия. Это препятствует развитию в почве типичных эпифитных копитрофных видов дрожжей [28].

### Антропогенные факторы, определяющие инвазию борщевика Сосновского

Этап антропогенной инвазии борщевика начался сравнительно недавно. Его наступлению предшествовал захват экологически пригодных для роста территорий, установление границ вторичного ареала [29]. Таким образом, первоначальным толчком для распространения борщевика явились заброшенные сельскохозяйственные земли [3]. Меньшее проникновение и численность *H. sosnowskyi* отмечается в ненарушенных естественных местообитаниях. В настоящее время наибольшее количество очагов борщевика обнаруживается на участках, расположенных вдоль дорог по градиенту влажности [7, 30]. Распространение семян борщевика вдоль дорог отмечается даже в зимний период. Оно происходит посредством перемещения отломившихся зонтиков ветром. Следует отметить, что дальность перемещения зонтиков по ровной поверхности заледенелых дорог может составлять сотни метров [5]. К средствам распространения борщевика Сосновского вдоль дорог относят также авто- и железнодорожный транспорт [10].

Распространение засорённой жизнеспособными семенами борщевика Сосновского почвы является также значимым антропогенным фактором. Этот процесс может происходить, например, в ходе строительства. Часто источником распространения семян является человек. Семена в осенний, обычно дождливый период попадают с почвой в глубокие протекторы обуви и могут переноситься на большие расстояния [31].

Созданию новых сред для распространения борщевика Сосновского способствует вырубка лесов, строительство дорог, а также зданий. Так, быструю колонизацию борщевиком северных районов Европейской части России зачастую связывают с деградацией северо-таёжных лесов под действием массовых вырубок. Быстрорастущий неприхотливый мелколиственный подрост, формирующий мелколиственный лес (берёзово-осиновый) на месте сплошной вырубки через 10–15 лет, создаёт благоприятные условия для борщевика. Так, весной, пока на деревьях ещё нет листвы, солнечные лучи беспрепятственно проникают к земле и нагревают её гораздо раньше и сильнее, чем в сосняках или ельниках на той же широте. Это позволяет семенам борщевика проклюнуться и обзавестись полноценными фотосинтезирующими листьями, снабжаю-

щими растение веществом и энергией для дальнейшего роста и развития [11].

### Меры борьбы с распространением борщевика Сосновского

Первые шаги на пути к разработке мер по борьбе с борщевиком Сосновского начались в 2015 г., когда он утратил статус сельскохозяйственной культуры и был внесён в Отраслевой классификатор сорных растений РФ [32].

К настоящему времени известен большой спектр способов борьбы с распространением борщевика Сосновского. В их основе лежат различные методы (механические, химические, биологические и прочие).

Для борьбы с небольшими популяциями или единичными особями борщевика Сосновского эффективны механические методы. К ним относят выкапывание и уничтожение стеблекорней, срезание или скашивание растений, удаление соцветий. При выкапывании стеблекорней с находящимися на них почками возобновления гибель растений составляет от 92,1 до 100% [33].

Известен также метод борьбы с борщевиком путём деформации свойственных для этого вида параметров циркадных ритмов. Метод основан на мульчировании вегетативного растения свежескошенной травой или другим сыпучим материалом (например, соломой). В результате листья борщевика под слоем мульчи постепенно теряют зелёную окраску, буреют и отмирают [34].

Одним из наиболее эффективных методов борьбы является термический (термическая прополка). Метод предполагает еженедельную обработку двух- и многолетних растений горячей водой (90–100 °С), что приводит к прекращению отрастания новых листьев и развития генеративного побега [35]. В качестве источника теплового воздействия используют не только воду, но и газовые горелки, инфракрасные нагреватели. Тепло, которое выделяется при этом, вызывает у растений тепловой шок [36]. Известен также электромеханический метод борьбы с борщевиком с помощью излучателя сверхчастот ИСЧ-19. Он позволяет уничтожать корни и семена борщевика [37].

Перспективным и экологичным направлением в борьбе с распространением борщевика на сельскохозяйственных угодьях является выращивание культур, способных конкурировать с ним. Значительные успехи в этом направлении достигнуты с отдельными

сортами топинамбура (Скороспелка, Интерес и Violet de Rennes), дающих высокий урожай зелёной массы (до 0,6 т/га) [38]. Для более крупных очагов распространения борщевика в качестве замещающих культур используют ель обыкновенную, а также сосну обыкновенную. Высаживают 3–10-летние саженцы с шагом 1–1,5 м с расстоянием между рядами 1–2 м. При смыкании крон замещающих культур происходит вытеснение борщевика Сосновского [39].

Учитывая тот факт, что на инвазивность борщевика Сосновского оказывает влияние плотность фитоценозов, в рамках борьбы с его распространением рекомендуют высевать на полях растительные виды, формирующие плотный травостой. Среди них щетинник сизый, овсяница луговая, ежа сборная, тимофеевка луговая, одуванчик лекарственный и другие виды [40, 41].

Разработан способ механического уничтожения борщевика путём восстановления ландшафта в ранневесенний период. Способ предполагает использование сплошного гибкого водонепроницаемого материала с плотностью, обеспечивающей проникновение сквозь него корней задерживающих трав [42]. Спектр предлагаемых с этой целью материалов при этом достаточно широк [43].

Механическое скашивание эффективно для снижения плотности популяции борщевика. Максимальная гибель особей борщевика в процессе скашивания отмечается при 4–5-кратном кошении участка и составляет 8,6–12,1%. К механическому способу уничтожения борщевика относится также дискование и вспашка. Вспашку проводят весной, а после – дискование (4–5 раз за сезон) с перерывом в 25–30 дней [44, 45].

Практикуется вывоз грунта, засорённого жизнеспособными семенами борщевика Сосновского, в выработанные карьеры. После их заполнения засорённым семенами борщевика грунтом производится отсыпка их чистым от семян 20-см слоем почвы и создание на выровненной площадке плотного травостоя из многолетних видов злаковых трав (ежа сборная, тимофеевка луговая, райграс пастбищный). После временной консервации в течение 4–5 лет грунт может быть использован для благоустройства и озеленения территории [31].

Стравливание путём выпаса скота является ещё одним приёмом уничтожения борщевика Сосновского. С этой целью особенно эффективен выпас овец (20–30 овец на 1 га), коз, лошадей в период начала интенсивного роста растений борщевика [31].

Стратегия биологической борьбы с борщевиком включает поиск эффективных, безопасных и специфичных фитофагов или фитопатогенов, способных к самостоятельному распространению из точек интродукции для подавления целевых заносных (инвазивных) видов растений [46]. Известны способы уничтожения одновозрастных зарослей борщевика, заключающиеся в предварительном стимулировании местных насекомых к переходу на питание борщевиком. Стимулирование осуществляют путём выращивания пастернака посевного. После появления на зонтиках пастернака гусениц местных насекомых-вредителей, зонтики срезают и переносят в заросли борщевика [43].

Химические методы борьбы с борщевиком Сосновского заключаются в использовании гербицидов. Они предполагают обработку как поверхности почвы, так и листьев растений борщевика. Применять данный метод из-за токсичности препаратов целесообразно при обработке зарослей борщевика вблизи автомобильных трасс, железнодорожного полотна. Спектр предлагаемых гербицидов при этом достаточно широк (Магнум, Торнадо 500, Агностар и др.) [47, 48]. Например, ингибирование вегетативной массы борщевика Сосновского в зависимости от нормы внесения «Магнум» в первый год обработки составляет от 80,2 до 98,8%. При этом через год после внесения данного гербицида происходит активное зарастание участков злаковыми растениями (ежа сборная, тимофеевка луговая) на 33,2–67,8% [49]. Обработка гербицидами, как правило, более эффективна в период от начала отрастания борщевика до начала цветения [50, 51]. Менее агрессивным средством борьбы с борщевиком по сравнению с гербицидами является применение минеральных солей, например, хлорида натрия. Способ применения заключается в обработке молодого растения борщевика ранней весной растворами солей. Для уничтожения взрослых особей производится засыпание кристаллической соли в срезанный ствол борщевика [39, 52].

### Заключение

Борщевик Сосновского является одним из самых агрессивных инвазивных видов, способных быстро распространяться и вытеснять местные виды растений, нарушая как природные, так и антропогенные экосистемы. Экологические факторы, включающие климатические и почвенные условия, межвидовые

связи, а также различные виды хозяйственной деятельности человека, определяют границы вторичного ареала борщевика Сосновского. В то же время действие экологических факторов в комплексе с высокой адаптивностью борщевика к различным условиям среды обитания инициируют естественную и антропогенную инвазию данного вида. В связи с этим для определения способа борьбы с борщевиком Сосновского важно учитывать не только эффективность мер (механические, физические, химические, биологические), но и роль экологических факторов, определяющих жизнеспособность данного растения.

Борьба с борщевиком Сосновского является сложной и длительной задачей, требующей учёта не только биологических особенностей борщевика, но и условий, которые складываются в местах его распространения. С помощью комплекса мер по борьбе с данным инвазивным видом можно снизить воздействие его на экосистему и предотвратить дальнейшее распространение борщевика Сосновского с целью сохранения биоразнообразия.

*Работа выполнена в рамках государственного задания ИБ ФИЦ Коми НЦ УрО РАН по теме «Структура и состояние компонентов техногенных экосистем подзоны южной тайги», номер государственной регистрации в ЕГИСУ № 1220401000325.*

## Литература

1. Кондратьев М.Н., Бударин С.Н., Ларикова Ю.С. Физико-экологические механизмы проникновения борщевика Сосновского (*Heracleum sosnowskyi* Manden.) в неиспользуемые агроэкосистемы // Известия Тимирязевской сельскохозяйственной академии. 2015. № 2. С. 36–49.
2. Тамразова О.Б., Селезнев С.П., Тамразова А.В. Фитодерматиты у детей, вызванные борщевиком Сосновского // Педиатрия. Consilium Medicum. 2019. № 2. С. 53–57.
3. Садовникова Т.П., Ульянкина Т.Д., Снакин В.В. Опасный интродуцент: борщевик Сосновского // Использование и охрана природных ресурсов в России. 2018. № 3 (155). С. 61–65.
4. Панасенко Н.Н. Некоторые вопросы биологии и экологии борщевика Сосновского // Российский журнал биологических инвазий. 2017. Т. 10. № 2. С. 95–106.
5. Krivosheina M.G., Petrosyan V.G., Ozerova N.A. Distribution of seeds of the giant hogweed (*Heracleum sosnowskyi* Manden.) in the winter period // Russian Journal of Biological Invasions. 2020. V. 11. No. 4. P. 318–325.
6. Товстик Е.В., Адамович Т.А., Ашихмина Т.Я. Идентификация участков массового роста борщевика Сосновского с помощью спектральных индексов по данным Sentinel-2 // Теоретическая и прикладная экология. 2019. № 3. С. 34–40.
7. Afonin A.N., Luneva N.N., Li Yu.S., Kotsareva N.V. Ecological-geographical analysis of distribution pattern and occurrence of cow-parsnip (*Heracleum sosnowskyi* Manden.) with respect to area aridity and its mapping in european Russia // Russian Journal of Ecology. 2017. V. 48. No. 1. P. 86–89.
8. Abramova L.M., Golovanov Y.M., Rogozhnikova D.R. Sosnovsky hogweed (*Heracleum sosnowskyi* Manden., Apiaceae) in Bashkortostan // Russian Journal of Biological Invasions. 2021. V. 12. No. 2. P. 127–135.
9. Ozerova N.A., Krivosheina M.G. Patterns of secondary range formation for *Heracleum sosnowskyi* and *H. mantegazzianum* on the territory of Russia // Russian Journal of Biological Invasions. 2018. V. 9. No. 2. P. 155–162.
10. Антипина Г.С., Антипин В.К. Расселение борщевика Сосновского (*Heracleum sosnowskyi* Manden.) по реке Лососинке (в пределах города Петрозаводска) // Hortus botanicus. 2019. Т. 14. С. 357–364.
11. Семенова И.С. Риск инвазии на примере распространения борщевика Сосновского // Тренды современной географии и географического образования: Материалы Всерос. научн.-практ. конф. с междунар. уч. Курск: Курский государственный университет, 2020. С. 108–114.
12. Прохоров В.Н., Ламан Н.А., Мишина М.Ю., Росоленко С.И., Тимофеева И.В. Экспресс-метод определения жизнеспособности семян борщевика Сосновского (*Heracleum sosnowskyi* Manden.) // Клеточная биология и биотехнология растений: Междунар. научн.-практ. конференция. Минск: Белорусский государственный университет, 2013. С. 177.
13. Маслова С.П., Малышев Р.В., Далькэ И.В. Влияние температуры на рост и энергетический баланс молодых тканей борщевика Сосновского в условиях Севера // Экология и география растений и растительных сообществ: Материалы IV междунар. научн. практ. конф. Екатеринбург: Гуманитарный университет, 2018. С. 555–559.
14. Борщевик Сосновского. Чёрная книга флоры средней России. Чужеродные виды растений в экосистемах средней России [Интернет-ресурс] <http://www.bookblack.ru/> (Дата обращения: 20.11.2022).
15. Лунева Н.Н. Борщевик Сосновского в Российской Федерации // Защита и карантин растений. 2014. № 3. С. 12–18.
16. Далькэ И.В., Чадин И.Ф., Захойий И.Г., Мальцев Р.В., Тишин Д.В. Разработка модели переноса семян борщевика Сосновского воздушными потоками // Математическое моделирование в экологии: Материалы Шестой Национальной научн. конф. с междунар. уч. Пушино: ФИЦ РАН, 2019. С. 70–71.

17. Ozerova N.A., Shirokova V.A., Krivosheina M.G., Petrosyan V.G. The spatial distribution of Sosnowsky's hogweed (*Heracleum sosnowskyi*) in the valleys of big and medium rivers of the east european plain (on materials of field studies 2008–2016) // Russian Journal of Biological Invasions. 2017. V. 8. No. 4. P. 327–346.
18. Мейсуро́ва А.Ф., Забенкова С.В. Сравнительный анализ содержания металлов в вегетативных органах борщевика Сосновского на антропогенно-трансформированных территориях // Вестник Тверского государственного университета. Серия: Биология и экология. 2020. № 2 (58). С. 111–128.
19. Товстик Е.В., Липатников А.Е., Зивенко М.В., Ашихмина Т.Я. Исследование накопления тяжёлых металлов растениями *Heracleum sosnowskyi* Manden. // Экология родного края: проблемы и пути их решения: Материалы XIII Всеросс. научн.-практ. конф. с междунар. уч. Кн. 2. Киров: Вятский государственный университет, 2018. С. 175–178.
20. Товстик Е.В., Липатников А.Е. Влияние инвазии борщевика Сосновского на состояние почв // Антропогенная трансформация геопространства: природа, хозяйство, общество: Материалы V Междунар. научн.-практ. конф. Волгоград: Волгоградский государственный университет, 2019. С. 333–338.
21. Павлов А.В., Баранова Н.Д., Шурупов Е.А. Аннергия инвазионных растений на примере борщевика Сосновского // Естествознание: исследование и обучение: Материалы научн.-практ. конф. Ярославль: Ярославский государственный педагогический университет им. К.Д. Ушинского, 2020. С. 246–254.
22. Balezentiene L., Stankeviciene A., Snieskiene V. *Heracleum sosnowskyi* (Apiaceae) seed productivity and establishment in different habitats of central Lithuania // Ecologyia. 2013. V. 59. No. 3. P. 123–133.
23. Пестов С.В., Филиппов Н.И. Фитофаги борщевика Сосновского (*Heracleum sosnowskyi* Manden.) в условиях Республики Коми // Актуальные вопросы аграрной науки: теория и практика: Материалы Всеросс. научн.-практ. конф., посвящённой 70-летию агрономического факультета. Киров: Вятская ГСХА, 2014. С. 149–151.
24. Кривошеина М.Г., Рихтер В.А. Мухи-тахины (Diptera: tachinidae) – опылители аборигенных и чужеродных видов зонтичных растений в Московской области (Россия) // Кавказский энтомологический бюллетень. 2015. Т. 11. № 1. С. 215–220.
25. Устинова Е.Н., Савина К.А., Лысенков С.Н. Новые данные о консортивных связях борщевика Сосновского с антофильными насекомыми // Российский журнал биологических инвазий. 2017. Т. 10. № 3. С. 98–112.
26. Товстик Е.В., Широких А.А., Широких И.Г. Микробные сообщества прикорневой зоны борщевика Сосновского // Вестник современных исследований. 2018. № 10.7 (25). С. 181–186.
27. Кондакова Л.В., Кислицына А.П. Влияние борщевика Сосновского (*Heracleum sosnowskyi* Manden.) на фототрофные микроорганизмы почвы // Биодиагностика состояния природных и природно-техногенных систем: Материалы XIX Всеросс. научн.-практ. конф. с междунар. уч. Киров: Вятский государственный университет, 2021. С. 213–216.
28. 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.
29. Лаптева Е.М., Захожий И.Г., Далькэ И.В., Смотрина Ю.А., Генрих Э.А. Влияние инвазии борщевика Сосновского (*Heracleum sosnowskyi* Manden.) на плодородие постагрогенных почв Европейского Северо-Востока // Теоретическая и прикладная экология. 2021. № 3. С. 66–73.
30. Арепьева Л.А., Арепьев Е.И., Казаков С.Г. Распространение борщевика Сосновского (*Heracleum sosnowskyi* Manden.) на южной границе вторичного ареала в европейской части России // Российский журнал биологических инвазий. 2021. Т. 14. № 2. С. 2–15.
31. Ламан Н.А., Прохоров В.Н. Распространение борщевика Сосновского (*Heracleum sosnowskyi* Manden.) при использовании плодородного слоя почвы со строительных площадок // Природные ресурсы. 2019. № 2. С. 113–121.
32. Отраслевой классификатор сорных растений: информ. издание. М.: ФГБНУ «Росиформагротех», 2018. 52 с.
33. Шкляревская О.А. Нормы внесения гербицида Магнум в борьбе с борщевиком Сосновского (*Heracleum sosnowskyi* Manden.) // Земледелие и растениеводство. 2017. № 5. С. 34–37.
34. Semchuk N.N., Balun O.V., Gladkikh S.N. Influence of deformation of circadian rhythms on changes in ontogenesis of *Heracleum sosnowskyi* Manden. plants // IOP conference series: earth and environmental science. 2021. Article No. 012090.
35. Антипина Г.С., Маганов И.А. Термическое воздействие как метод борьбы с борщевиком Сосновского // Hortus botanicus. 2018. Т. 13. С. 67–77.
36. Ivashchenko O., Makukh Ya., Remeniuk S., Moshkivska S., Riznyk V., Auškalnienė O., Kadžienė G. Non-chemical control methods of Sosnowsky's hogweed (*Heracleum sosnowskyi* Manden.) // Zemdirbyste-Agriculture. 2022. V. 109. No. 3. P. 269–276.
37. Кудрявцев А.В., Калинин И.С., Бабаев Ш.М., Голубев В.В. Результаты исследования воздействия излучателя ИСЧ-19 на свойства почвы при угнетении борщевика Сосновского // Электротехнологии и электрооборудование в АПК. 2021. Т. 68. № 1 (42). С. 99–104.
38. Комаров А.А., Анушкевич Н.Ю. Способ уничтожения борщевика // Патент RU 2017126571A. Заявление: 2017126571, 24.07.2017. Дата публикации: 24.01.2019. Бюлл. 03.

References

39. Степанов Г.П. Способ уничтожения борщевика Сосновского // Патент RU 2706466С1. Заявление: 2019101296, 15.01.2019. Дата публикации: 19.11.2019. Бюлл. 32.

40. Чегодаева Н.Д., Маскаева Т.А., Лабутина М.В. Аллелопатическое влияние борщевика Сосновского (*Heracleum sosnowskyi* Manden.) на культурные растения // Фундаментальные исследования. 2015. № 2 (Ч. 26). С. 5845–5849.

41. Лунева Н.Н. Борщевик Сосновского в России: современный статус и актуальность его скорейшего подавления // Вестник защиты растений. 2013. № 1. С. 29–43.

42. Кривошеина М.Г., Озерова Н.А. Способы уничтожения борщевика Сосновского // Патент RU 2556068 С1. Заявлени: 2014114043/13, 2014.04.10. Дата публикации: 10.07.2015. Бюлл. 19.

43. Чадин И.Ф., Далькэ И.В., Шелякин М.А., Габова Е.В. Способ борьбы с многолетними сорными растениями // Патент RU 2594517С2. Заявлени: 2015100417/13, 12.01.2015. Дата публикации: 20.08.2016. Бюлл. 23.

44. Мерзвинский Л.М., Высоцкий Ю.И. Анализ эффективности мероприятий по борьбе с инвазивными видами борщевика // Наука – образованию, производству, экономике: Материалы 72-й Регион. науч.-практ. конф. преподавателей, науч. сотрудников и аспирантов, Витебск: ВГУ имени П.М. Машерова, 2020. С. 70–72.

45. Джабборов Н.И., Добринов А.В. Оценка эффективности использования почвообрабатывающего агрегата с кольцевыми рабочими органами в борьбе с борщевиком Сосновского // АгроЭкоИнженерия. 2021. № 3 (108). С. 75–90.

46. Берестецкий А.О. Перспективы разработки биологических и биорациональных гербицидов // Вестник защиты растений. 2017. № 1 (91). С. 5–12.

47. Мотыль М., Гаранович И., Галынская Н., Титок В. Биорациональные гербициды – радикальное средство победы над борщевиком // Наука и инновации. 2013. № 6 (124). С. 67–70.

48. Бакей С.К., Мотыль М.М., Созинов О.В., Высоцкий Ю.И. Региональные особенности борьбы с инвазией видов золотарника средствами защиты растений в Беларуси // Вопросы степеведения. 2023. № 1. С. 53–64.

49. Шкляревская О., Якимович Е. Стратегии борьбы с борщевиком // Наука и инновации. 2019. № 5 (195). С. 75–79.

50. Антипина Г.С., Маганов И.А. Опыт борьбы с борщевиком Сосновского // Защита и карантин растений. 2018. № 7. С. 30–32.

51. Куликова Н.А. Получение и масштабы применения гербицидов: история и современные тенденции // Проблемы агрохимии и экологии. 2020. № 2. С. 52–68.

52. Говоров Д.Н., Живых А.В., Шабельникова А.А. Борщевик Сосновского говорим нет! // Защита и карантин растений. 2016. № 9. С. 11–12.

1. Kondratiev M.N., Budarin S.N., Larikova Y.S. Physiological and ecological mechanisms of invasive penetration of sosnowskyi Hogweed (*Heracleum sosnowskyi* Manden.) in unexploitable agroecosystems // Izvestiya Timiryazevskoy selskokhozyaystvennoy akademii. 2015. No. 2. P. 36–49 (in Russian).

2. Tamrazova O.B., Seleznev S.P., Tamrazova A.V. Htodermatitis in children caused by the sosnowski Hogweed // Pediatriya. 2019. No. 2. P. 53–57 (in Russian). doi: 10.26442/26586630.2019.2.190418

3. Sadovnikova T.P., Ulyankina T.D., Snakin V.V. Dangerous introduce: the *Heracleum sosnowskyi* Manden. // Ispolzovanie i okhrana prirodnykh resursov v Rossii. 2018. No. 3 (155). P. 61–65 (in Russian).

4. Panasenko N.N. Some issues in biology and ecology of *Heracleum sosnowskyi* Manden. // Russian Journal of Biological Invasions. 2017. V. 10. No. 2. P. 95–106 (in Russian).

5. Krivosheina M.G., Petrosyan V.G., Ozerova N.A. Distribution of seeds of the giant hogweed (*Heracleum sosnowskyi* Manden.) in the winter period // Russian Journal of Biological Invasions. 2020. V. 11. No. 4. P. 318–325. doi: 10.1134/S2075111720040049

6. Tovstik E.V., Adamovich T.A., Ashikhmina T.Ya. Identification of sites of mass growth of *Heracleum sosnowskyi* Manden. using spectral indices according to Sentinel-2 images // Theoretical and Applied Ecology. 2019. No. 3. P. 34–40 (in Russian). doi: 10.25750/1995-4301-2019-3-034-040

7. Afonin A.N., Luneva N.N., Li Yu.S., Kotsareva N.V. Ecological-geographical analysis of distribution pattern and occurrence of cow-par snip (*Heracleum sosnowskyi* Manden.) with respect to area aridity and its mapping in european Russia // Russian Journal of Ecology. 2017. V. 48. No. 1. P. 86–89. doi: 10.1134/S1067413617010039

8. Abramova L.M., Golovanov Y.M., Rogozhnikova D.R. Sosnovsky hogweed (*Heracleum sosnowskyi* Manden., Apiaceae) in Bashkortostan // Russian Journal of Biological Invasions. 2021. V. 12. No. 2. P. 127–135. doi: 10.1134/S2075111721020028

9. Ozerova N.A., Krivosheina M.G. Patterns of secondary range formation for *Heracleum sosnowskyi* and *H. mantegazzianum* on the territory of Russia // Russian Journal of Biological Invasions. 2018. V. 9. No. 2. P. 155–162. doi: 10.1134/S2075111718020091

10. Antipina G.S., Antipin V.K. Settlement of Hogweed sosnovsky (*Heracleum sosnowskyi* Manden.) on the Lososinka river (within the city of Petrozavodsk) // Hortus botanicus. 2019. V. 14. P. 357–364 (in Russian). doi: 10.15393/j4.art.2019.6705

11. Semenova I.S. The risk of invasion on the example of the distribution of Hogweed sosnowski // Trendy sovremennoy geografii i geograficheskogo obrazovaniya: Materialy Vserossiyskoy nauchno-prakticheskoy konfer-

- entsii s mezhdunarodnym uchastiem. 2020. P. 108–114 (in Russian).
12. Prokhorov V.N., Laman N.A., Mishina M.Yu., Rosolenko S.I., Timofeeva I.V. Express method for determining the viability of seeds of Hogweed *sosnowski* (*Heracleum sosnowskyi* Manden.) // Cell biology and plant biotechnology: Mezhdunarodnaya nauchno-prakticheskaya konferentsiya. 2013. P. 177 (in Russian).
13. Maslova S.P., Malyshev R.V., Dalke I.V. Effect of temperature on growth and energy balance of *Heracleum sosnowskyi* young tissues in the north // Ecology and geography of plants and vegetation communities: Materialy IV mezhdunarodnoy nauchnoy konferentsii. 2018. P. 555–559 (in Russian).
14. Borshchevik Sosnovskogo. Chernaya kniga flory sredney Rossii. Chuzherodnye vidy rasteniy v ekosistemakh sredney Rossii [Internet resource] <http://www.bookblack.ru/> (Accessed: 20.11.2022) (in Russian).
15. Luneva N.N. *Heracleum sosnowskyi* in the Russian Federation // Zashchita i karantin rasteniy. 2014. No. 3. P. 12–18 (in Russian).
16. Dalke I.V., Chadin I.F., Zakhochiy I.G., Malyshev R.V., Tishin D.V. Development of a model for the transfer of seeds of Hogweed *sosnowski* by air currents // Mathematical modeling in ecology: Materialy VI Natsionalnoy nauchnoy konferentsii s mezhdunarodnym uchastiem. 2019. P. 70–71 (in Russian).
17. Ozerova N.A., Shirokova V.A., Krivosheina M.G., Petrosyan V.G. The spatial distribution of *Sosnowsky's* hogweed (*Heracleum sosnowskyi*) in the valleys of big and medium rivers of the east european plain (on materials of field studies 2008–2016) // Russian Journal of Biological Invasions. 2017. V. 8. No. 4. P. 327–346. doi: 10.1134/S2075111717040075
18. Meysurova A.F., Zabenkova S.V. Comparative analysis of metal content in the vegetative organs of the *Heracleum sosnowskyi* Manden. from agro- and urboecosystem // Vestnik Tverskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: biologiya i ekologiya. 2020. No. 2 (58). P. 111–128 (in Russian). doi: 10.26456/vtbio154
19. Tovstik E.V., Lipatnikov A.E., Zivenko M.V., Ashikhmina T.Ya. Study of the accumulation of heavy metals by plants *Heracleum sosnowskyi* Manden. // Ecology of the native land: problems and ways to solve them: Materialy XIII Vserossiyskoy nauchno-prakticheskoy konferentsii c mezhdunarodnym uchastiem. Book 2. 2018. P. 175–178 (in Russian).
20. Tovstik E.V., Lipatnikov A.E. Influence of invasion of Hogweed *sosnowski* on the state of soils // Anthropogenic transformation of geospace: nature, economy, society: priroda, khozyaystvo, obshchestvo: Materialy V Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii. 2019. P. 333–338 (in Russian).
21. Pavlov A.V., Baranova N.D., Shurupov E.A. Annergy of invasive plants on the example of Hogweed *sosnowski* // Natural Science: Research and Teaching: Materialy konferentsii “Chteniya Ushinskogo”. 2020. P. 246–254 (in Russian).
22. Balezentiene L., Stankeviciene A., Snieskiene V. *Heracleum sosnowskyi* (Apiaceae) seed productivity and establishment in different habitats of central Lithuania // Ekologija. 2013. V. 59. No. 3. P. 123–133. doi: 10.6001/ekologija.v59i3.2795
23. Pestov S.V., Filippov N.I. Phytophages of (*Heracleum sosnowskyi* Manden.) in the Komi Republic // Topical issues of agricultural science: theory and practice: Materialy vserossiyskoy nauchno-prakticheskoy konferentsii, posvyashchennoy 70-letiyu agronomicheskogo fakulteta. 2014. P. 149–151 (in Russian).
24. Krivosheina M.G., Richter V.A. Tachinid flies (Diptera: Tachinidae), pollinators of aboriginal and alien species of the umbel plants (Apiaceae) in Moscow region (Russia) // Kavkazskiy entomologicheskii byulleten. 2015. V. 11. No. 1. P. 215–220 (in Russian).
25. Ustinova E.N., Savina K.A., Lysenkov S.N. New data on consortive associations of *Heracleum sosnowskyi* with anthophilous insects // Russian Journal of Biological Invasions. 2017. V. 10. No. 3. P. 98–112 (in Russian).
26. Tovstik E.V., Shirokikh A.A., Shirokikh I.G. Microbial communities of the root zone of Hogweed *sosnowski* // Vestnik sovremennykh issledovaniy. 2018. No. 10.7 (25). P. 181–186 (in Russian).
27. Kondakova L.V., Kislitsyna A.P. Influence of (*Heracleum sosnowskyi* Manden.) on phototrophic soil microorganisms // Biodiagnostics of the state of natural and natural-technogenic systems: Materialy XIX Vserossiyskoy nauchno-prakticheskoy konferentsii c mezhdunarodnym uchastiem. 2021. P. 213–216 (in Russian).
28. 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. doi: 10.1134/S1064229315020040
29. Lapteva E.M., Zakhochiy I.G., Dalke I.V., Smotrina Y.A., Genrikh E.A. Influence of *Heracleum sosnowskyi* Manden. invasion on postagrogenic soil fertility in European North-East // Theoretical and Applied Ecology. 2021. No. 3. P. 66–73 (in Russian). doi: 10.25750/1995-4301-2021-3-066-073
30. Arepieva L.A., Arepiev E.I., Kazakov S.G. Distribution of *Sosnovsky* hogweed (*Heracleum sosnowskyi*) on the southern border of the secondary range in the european part of Russia // Russian Journal of Biological Invasions. 2021. V. 14. No. 2. P. 2–15 (in Russian). doi: 10.35885/1996-1499-2021-14-2-2-15
31. Laman N.A., Prokhorov V.N. Distribution of *Sosnowsky's* hogweed (*Heracleum sosnowskyi* Manden.) when using fertile soil layer from building sites // Natural resources. 2019. No. 2. P. 113–121 (in Russian).
32. Branch classifier of weeds: inform. edition. Moskva: FGBNU “Rosiformagrotekh”, 2018. 52 p. (in Russian).



33. Shklyarevskaya O.A. Rates of herbicides based on metsulfuron-methyl application for cow parsnip (*Heracleum sosnowskyi* Manden.) control // Crop Farming and Plant Growing. 2017. No. 5. P. 34–37 (in Russian).
34. Semchuk N.N., Balun O.V., Gladkikh S.N. Influence of deformation of circadian rhythms on changes in ontogenesis of *Heracleum sosnowskyi* Manden. plants // IOP conference series: earth and environmental science. 2021. Article No. 012090. doi: 10.1088/1755-1315/852/1/012090
35. Antipina G.S., Maganov I.A. Thermal treatment as a method of controlling *Heracleum sosnowskyi* // Hortus botanicus. 2018. V. 13. P. 67–77 (in Russian). doi: 10.15393/j4.art.2018.5122
36. Ivashchenko O., Makukh Ya., Remeniuk S., Moshkivska S., Riznyk V., Auškalnienė O., Kadžienė G. Non-chemical control methods of Sosnowsky's hogweed (*Heracleum sosnowskyi* Manden.) // Zemdirbyste-Agriculture. 2022. V. 109. No 3. P. 269–276. doi: 10.13080/z-a.2022.109.034
37. Kudryavtsev A.V., Kalinin I.S., Babaev Sh.M., Golubev V.V. The effect of the ISCh-19 emitter on the properties of soil under the suppression of Sosnovsky hogweed // Elektrotekhnologii i elektrooborudovanie v APK. 2021. V. 68. No. 1 (42). P. 99–104 (in Russian). doi: 10.22314/2658-4859-2021-68-1-99-104
38. Komarov A.A., Anushkevich N.Yu. How to destroy hogweed // Patent RU 2017126571A. Application: 2017126571, 24.07.2017. Date of publication: 24.01.2019. Bull. 03 (in Russian).
39. Stepanov G.P. The method of destruction of hogweed Sosnovsky // Patent RU 2706466C1. Application: 2019101296, 15.01.2019. Date of publication: 19.11.2019. Bull. 32 (in Russian).
40. Chegodaeva N.D., Maskaeva T.A., Labutina M.V. Allelopathic influence of Sosnowsky's hogweed (*Heracleum sosnowskyi* Manden.) on cultivated plants // Fundamentalnye issledovaniya. 2015. No. 2 (P. 26). P. 5845–5849 (in Russian).
41. Luneva N.N. *Heracleum sosnowskyi* in Russia: present status and relevance of its fastest suppression // Vestnik zashchity rasteniy. 2013. No. 1. P. 29–43 (in Russian).
42. Krivosheina M.G., Ozerova N.A. Methods for the destruction of hogweed Sosnovsky // Patent RU 2556068 C1. Application: 2014114043/13, 10.04.2014. Date of publication: 10.07.2015. Bull. 19 (in Russian).
43. Chadin I.F., Dalke I.V., Shelyakin M.A., Gabova E.V. Method of fighting permanent weeds // Patent RU 2594517C2. Application: 2015100417/13, 12.01.2015. Date of publication: 20.08.2016. Bull. 23 (in Russian).
44. Merzhvinsky L.M., Vysotsky Yu.I. Analysis of the effectiveness of measures to combat invasive hogweed species // Science – education, production, economics: Materialy 72-y Regionalnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii prepodavateley, nauchnykh sotrudnikov i aspirantov. 2020. P. 70–72 (in Russian).
45. Dzhabborov N.I., Dobrinov A.V. Efficiency of the tillage implement with ring-shaped tools in the Sosnovsky's hogweed control // AgroEkoInzheneria. 2021. No. 3 (108). P. 75–90 (in Russian).
46. Berestetskiy A.O. Prospects for the development of biological and biorational herbicides // Vestnik zashchity rasteniy. 2017. No. 1 (91). P. 5–12 (in Russian).
47. Motyl M., Garanovich I., Galynskaya N., Titok V. Biorational herbicides as a radical means of defeating hogweed // Nauka i innovatsii. 2013. No. 6 (124). P. 67–70 (in Russian).
48. Bakei S.K., Motyl M.M., Sozinov O.V., Vysotsky Yu.I. Regional features of the control of the invasion of goldenrod species by means of plant protection in Belarus // Voprosy stepovedeniya. 2023. No. 1. P. 53–64 (in Russian). doi: 10.24412/2712-8628-2023-1-53-64
49. Shklyarevskaya O., Yakimovich E. Hogweed control strategies // Nauka i innovatsii. 2019. No. 5 (195). P. 75–79 (in Russian).
50. Antipina G.S., Maganov I.A. Experience of control of *Heracleum sosnowskyi* // Zashchita i karantin rasteniy. 2018. No. 7. P. 30–32 (in Russian).
51. Kulikova N.A. Obtaining and application of herbicides: history and current trends // Problemy agrokhimii i ekologii. 2020. No. 2. P. 52–68 (in Russian). doi: 10.26178/AE.2020.2019.4.016
52. Govorov D.N., Zhiviykh A.V., Shabelnikova A.A. We say no to Sosnovsky's hogweed! // Zashchita i karantin rasteniy. 2016. No. 9. P. 11–12 (in Russian).

## Применение геоинформационного моделирования и фрактального анализа при геоэкологической оценке урбогеосистем

© 2023. Б. И. Кочуров, д. г. н., профессор, в. н. с.,  
М. А. Мовчан, аспирант,  
Институт географии РАН,  
119017, Россия, г. Москва, Старомонетный переулок, д. 29,  
e-mail: camertonmagazin@mail.ru

В статье апробируются современные методы геоэкологической оценки населённых пунктов, а именно ГИС-моделирование и фрактальный анализ. В последнее время они нашли широкое применение при количественной оценке как инфраструктурных компонентов городской среды – улично-дорожной сети, плотности застройки, степени транспортной доступности, так и средоформирующих, в роли которых выступают зелёные зоны. Методы ГИС-моделирования позволяют количественно оценить плотность распределения определённого компонента городской среды или рассчитать степень доступности в виде классификации и визуализировать результаты в пространственно-временном масштабе в удобном для восприятия виде. В работе оцениваются параметры густоты дорожной сети, плотности застройки и степень озеленения территории по спектральным индексам – NDVI и NDBI. При фрактальном анализе оценивается диапазон устойчивости среды населённых пунктов к факторам антропогенной нагрузки и, таким образом, выявляются ареалы с различной степенью выраженности техногенного воздействия по показателю фрактальной размерности – Df. Методы геоинформационного моделирования и фрактального анализа дополняют друг друга при геоэкологической оценке и позволяют давать более объективную оценку состояния городской территории.

**Ключевые слова:** геоинформационное моделирование, урбогеосистемы, фракталы, геоэкологическая оценка, устойчивое развитие, городская инфраструктура.

## Application of geoinformation modeling and fractal analysis in the geoecological assessment of urban geosystems

© 2023. B. I. Kochurov ORCID: 0000-0002-8351-3658, M. A. Movchan ORCID: 0009-0003-5741-941X,  
Institute of Geography of the Russian Academy of Sciences,  
29, Staromonetny Pereulok, Moscow, Russia, 119017,  
e-mail: camertonmagazin@mail.ru

The article tests modern methods of geo-ecological assessment of settlements, namely GIS modeling and fractal analysis. Recently, they have found wide application in quantifying both the infrastructural components of the urban environment – the street and road network, the density of buildings, the degree of transport accessibility, and the environment-forming ones, such as green zones. GIS modeling methods allow quantifying the distribution density of a certain component of the urban environment or calculating the degree of accessibility in the form of classification and visualizing the results on a spatiotemporal scale in a form convenient for perception. The paper evaluates the parameters of the density of the road network, the density of buildings and the degree of landscaping of the territory according to spectral indices – NDVI and NDBI. Fractal analysis evaluates the range of sustainability of the environment of settlements to factors of anthropogenic load and, thus, areas with varying degrees of severity of anthropogenic impact are identified by the indicator of fractal dimension. The methods of geoinformation modeling and fractal analysis complement each other in geoecological assessment and allow for a more objective assessment of the state of the urban area.

**Keywords:** geoinformation modeling, urban geosystems, fractals, geo-ecological assessment, sustainable development, accessibility.

Методы моделирования набирают всё большую популярность в геоэкологических исследованиях в системе природа–общество и нашли широкое применение в геоэкологической оценке урбанизированных территорий. Основными методическими подходами явля-

ются картографическое [1, 2] и математико-статистическое моделирование, в том числе с использованием приёмов ГИС-технологий [1, 3] и фрактального анализа [3–5]. На сегодняшний день, научных работ, в которых бы подробно освещалась методика моделирования при проведении геоэкологической оценки городов, крайне недостаточно [1, 4–7]. Применительно к изучаемой территории таких работ вовсе нет, вместе с тем, за последние 5–10 лет в Московской области, степень урбанизированности территории начинает приобретать трудно контролируемый характер, особенно в сфере размещения населения, градостроительства и развития транспортной сети, что влечёт за собой чрезмерное влияние антропогенных факторов на развитие урбогеосистемы, а также подавление роли других компонентов городской системы, например, озеленённых территорий [8].

Традиционных методов, таких как оценка уровня загрязнений, в том числе экологических рисков, связанных с загрязнением сред, вычисление эколого-хозяйственного баланса и применение разного рода индексов качества городской среды, недостаточно, поскольку они не в полной мере отражают изменения в градостроительстве и не учитывают степень развития антропогенных процессов, плотности их распределения в пространственно-временном поле, что не позволяет прогнозировать тенденции изменения состояния городских ландшафтов.

Моделирование с использованием ГИС-технологий, а именно, вычисление транспортной доступности, расчёт плотности улично-дорожной сети и застройки, классификация ландшафтов по данным дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ); а также расчёт фрактальной размерности позволяют решить обозначенные выше проблемы и, в значительной мере, оценить развитие городских территорий относительно их степени развитости и устойчивости.

Основой для выполнения исследования послужили работы в области геоэкологической оценки [1, 11, 12], применения индексов загрязнения воздушной и водной сред [1] и качества городской среды [13]; а также использования методов фрактального моделирования инфраструктуры города [1, 4, 9, 11]. Методы геоэкологической оценки являются основой для моделирования. В частности, в работах [2, 12, 14] приводятся подходы к геоэкологическому картографированию, детально описывается методика проведения геоэкологических оценок на примере г. Москвы. Но при этом

практически не учитывается инфраструктура и элементы градостроительной структуры, выступающие как факторы антропогенной нагрузки на городской ландшафт. Работы, в которых используются индексы загрязнения и показатели качества городской среды, ориентированы в основном на интегральную оценку загрязнения сред. Оценивание качества городской среды выражается в соотношении площадей естественных и изменённых ландшафтов и/или суммировании элементов антропогенной нагрузки, а вся процедура оценок носит рейтинговый характер. Однако, в последние годы, выделяются работы [1, 4, 5, 9, 15–18], в том числе зарубежные [6, 7], максимально приближенные к проблематике темы и посвящённые оценке транспортной сети и степени застройки территории, как факторов антропогенной нагрузки. В них широко представлены модельные и геоинформационные методы, но оценивание производится без конкретной привязки к структуре городского ландшафта.

Цель работы – изучение возможностей моделирования городских ландшафтов, инфраструктуры и других градостроительных компонентов города Видное при помощи геоинформационных систем и фрактального анализа.

### Объекты и методы исследования

Объектом исследования служит урбогеосистема г. Видное. Материалами для написания научной работы послужили статистические данные, включающие характеристику города; генеральный план городской части. Также были задействованы космические снимки территории за 2021–2022 гг. спутников Sentinel, материалы открытых данных (OSM – open street map – слои улично-дорожной сети, зданий и иных сооружений). Подготовка слоёв, географический анализ и классификация, а также оценка плотности транспортной сети, застройки и моделирование доступности производились в программных средах QGIS; а вычисление фрактальной размерности (послойно) в Gwyddion.

**Применение ДЗЗ съёмки для дифференциации естественных и антропогенных ландшафтов и их картографирование.** На первом этапе проводили скачивание снимков спутника Sentinel-2 в видимом, ближнем и среднем инфракрасном диапазонах, а также изображения с классами земель. Затем загружали их в среду QGIS и вычисляли индексы растительности и различий застройки. Следующий этап включал в себя наложение класси-

фикационной карты; подборку цветовых шкал и создание легенды, определение площадей каждой категории земель и перевод в процентный формат с помощью пропорционального соотношения. Нормализованные разностные индексы вегетации и различия застройки вычисляли по формулам [15]:

$$\begin{aligned} NDVI &= (NIR - RED) / (NIR + RED), & (1) \\ NDBI &= (SWIR - NIR) / (SWIR + NIR), & (2) \end{aligned}$$

где *NIR* – ближний инфракрасный диапазон (канал) с длиной волны 763–908 нм; *RED* – видимый красный с длиной волны 683–731 нм; *SWIR* – средний инфракрасный канал в диапазоне 1542–1685 нм.

Вычисление плотностей улично-дорожной сети (УДС) и застройки проводили средствами геоинформационных систем и цифровых моделей при помощи построения сетки 400 × 400 м, подсчёта точек в полигонах, суммы длин и количества дорог на единицу площади ячеек. Расчёт транспортной доступности осуществляли путём выборки главных (осевых) дорог населённого пункта, внесения информации о типе дорог, разрешённой скорости и расстояния в таблицу атрибутов. Затем создавали поле «время», по которому и производили расчёты доступности. Далее при помощи модуля способом линейной интерполяции проводили оценку транспортной доступности (в минутах).

**Фрактальный анализ градостроительного и инфраструктурного компонента.** Этот этап работ включал в себя: построение сетки с размером ячеек 400 на 400 м, наложение слоёв с УДС и зданиями (по отдельности); вычленение каждого квадрата с элементами средствами обработки изображений. Далее производили подсчёт размерности ячеек в среде Gwyddion методами **Box-counting (кубический)** и **Portioning**. Затем из полученных значений вычитали число 1,5 для того, чтобы приравнять результаты к «фракталам на плоскости», поскольку алгоритм методом кубов вычисляет фрактальную размерность для трёх сторон изображения. Результаты заносили в таблицу атрибутов слоя ячейки и визуализировали в числовом формате в виде заливки в программе QGIS. Формула, по которой производили расчёты фрактальной размерности, следующая [17]:

$$Df = \log N / \log (1/r), \quad (3)$$

где *Df* – фрактальная размерность, *1/r* – регулирующий коэффициент (например, если

предыдущая клетка делится на 36 клеток, то *r* = 6), *N* – количество заполненных квадратов в конкретном масштабе, т. е. если, например, элементы транспортной сети имеются в 20 квадратах из 20, то *Df* = 2.

В полном виде алгоритм проведения исследований представлен в таблице.

## Результаты и обсуждение

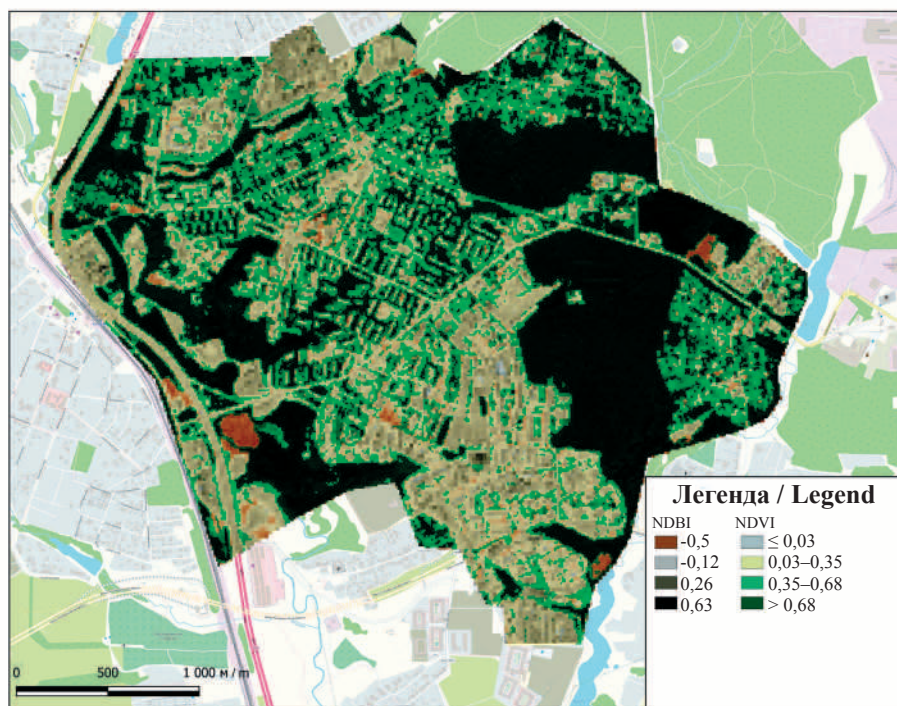
По результатам обработки данных ДЗЗ и цифровых моделей городской инфраструктуры был составлен ряд тематических карт. При анализе ландшафтной структуры и растительного покрова г. Видное было выявлено, что участки со значениями индекса NDVI более 0,68 соответствуют древесной растительности; травянисто-кустарниковый покров принимает значения от 0,35 до 0,68; открытая почва или асфальт имеют 0,03–0,35 ед. По другому индексу (NDBI) значения от -0,5 и менее соответствуют водным объектам и влажной почве; -0,12 – другие «запечатанные» пространства; 0,26 – покрытие крыш зданий.

По каждому показателю, а именно: древесная растительность, травянисто-кустарниковый покров, открытая почва и искусственные покрытия был рассчитан вклад в процентах от площади исследуемой территории. Результаты свидетельствуют о том, что наибольшую территорию в городском ландшафте занимают земли с древесным и травянистым покровом, составляя 60%. Второе место занимают искусственные покрытия (асфальтобетон, техногенные грунты и др.), особенно в юго-восточном направлении. Относительно высокий вклад зелёных зон в городе связан с широким распространением парков и озелённых и благоустроенных дворов с относительно удовлетворительным состоянием растительности. Центральная, западная и восточная части города озеленены в большей степени, с процентным вкладом порядка 70–80%, что совпадает с ранее полученными результатами [16]. Средний же показатель зелёных покрытий по населённому пункту составляет порядка 55%.

Полученные результаты свидетельствуют о достаточно хорошем озеленении большей части города и о высокой степени распространённости растительного покрова, особенно в виде парков-скверов и лесопарков, но в то же время, новые микрорайоны (юго-восточная, северная части), испытывают недостаток в озеленении (рис. 1, см. цв. вкладку I).

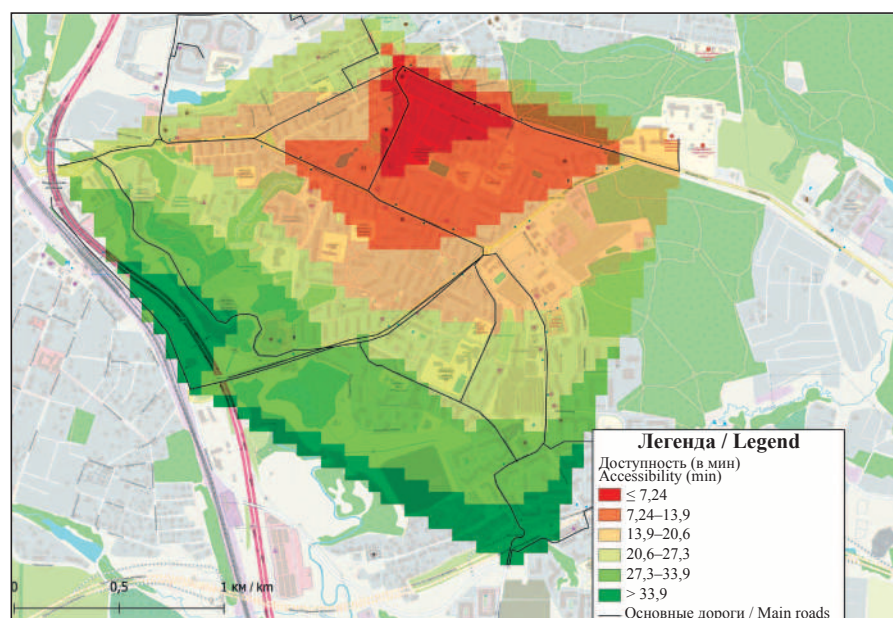
Средствами программы QGIS была оценена автотранспортная доступность и эколо-

**Б. И. Кочуров, М. А. Мовчан**  
**«Применение геоинформационного моделирования**  
**и фрактального анализа при геоэкологической оценке**  
**урбогеосистем». С. 32.**



**Рис. 1.** Ландшафтная карта на основе комбинированных данных ДЗЗ (классификации спектральных индексов – различий застройки NDBI и вегетационного индекса NDVI). Масштаб 1 : 32000

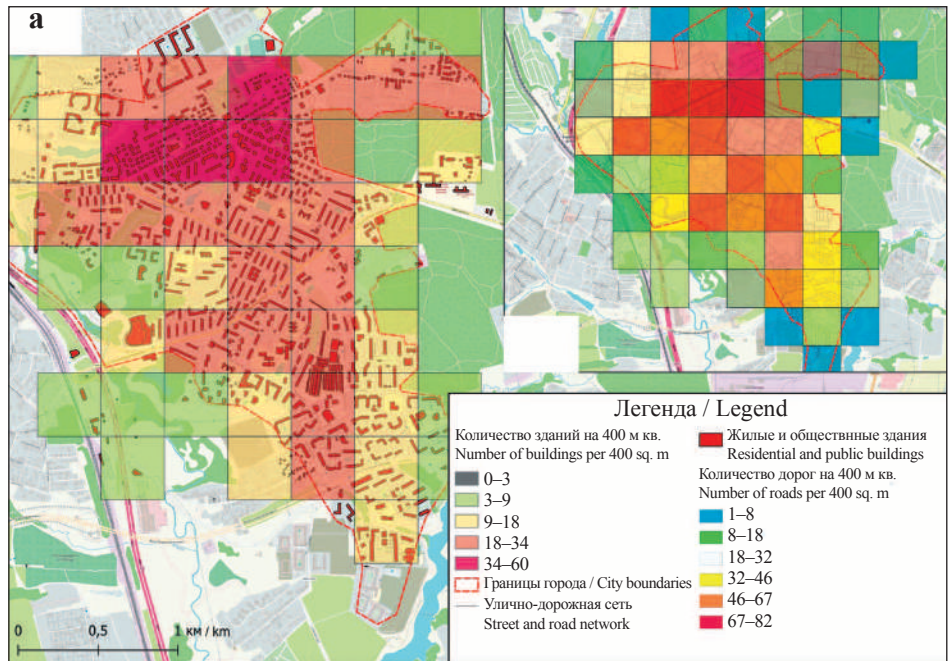
**Fig. 1.** Landscape map based on combined data of remote sensing (classification of spectral indices – different of building NDBI and vegetation index NDVI). 1 : 32000



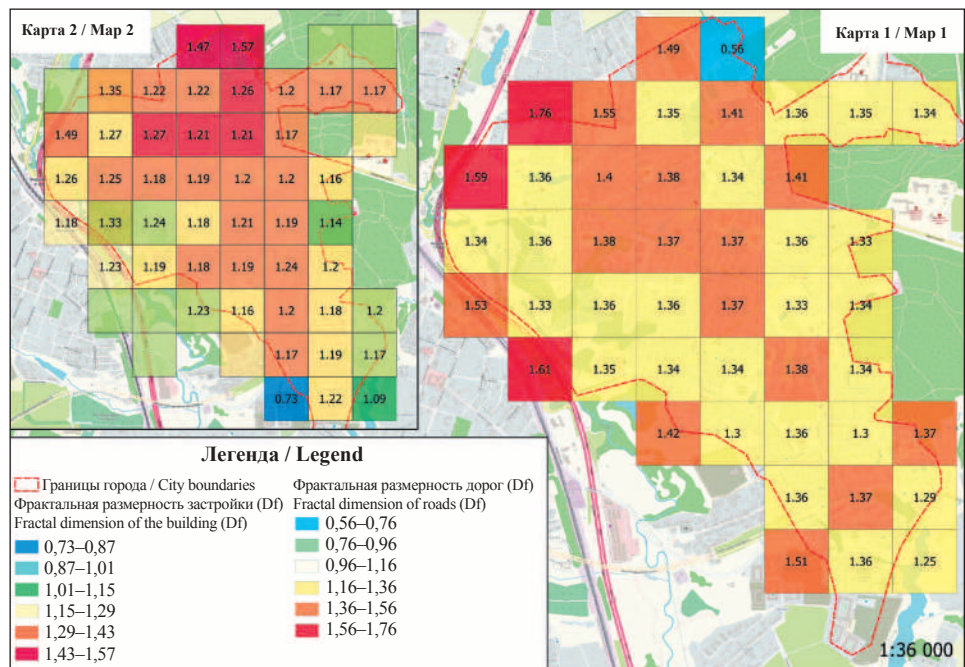
**Рис. 2.** Карта моделирования автотранспортной доступности по основным маршрутам (по времени) г. Видное. Масштаб 1 : 32000

**Fig. 2.** Transport accessibility simulation map along the main routes (by time) in Vidnoye city. 1 : 32000

**Б. И. Кочуров, М. А. Мовчан**  
**«Применение геоинформационного моделирования и фрактального анализа при геоэкологической оценке урбогеосистем». С. 32.**



**Рис. 3.** Карты плотности улично-дорожной сети (а) и застройки территории (б). Масштаб 1 : 36000  
**Fig. 3.** Map of road network (a) and building density (b). 1 : 36000



**Рис. 4.** Картосхемы моделирования фрактальной размерности транспортной инфраструктуры (1) и градостроительного компонента (2)  
**Fig. 4.** Schematic maps of modeling fractal dimension of transport infrastructure (1) and urban planning component (2)

Общий алгоритм проведения моделирования  
General algorithm conducting of modeling

Этапы / Stage	Содержание / Content	Результаты / Results
1. Подготовительный Preparatory	применение ДЗЗ съёмки для дифференциации естественных и антропогенных ландшафтов the use of remote sensing for the differentiation of natural and anthropogenic landscapes	подготовка мультиспектральных космоснимков, линейных и площадных слоёв preparation of multispectral space images, linear and areal layers
2. Основной Basic	расчёт процентного покрытия calculation of coverage percentage	построение картодиаграмм constructing cartodiagrams
	вычисление плотностей УДС и застройки calculation of road network and building density	подготовка картографического материала preparation of mapping material
	расчёт транспортной доступности calculation of transport accessibility	
	фрактальный анализ градостроительного и инфраструктурного компонента fractal analysis of urban planning and infrastructure component	подготовка таблиц и картографического материала preparation of tables and mapping material
3. Заключительный Final	сравнение и прогноз comparison and forecast	построение гистограмм и концептуальные прогнозы histogram construction and conceptual forecasts

гическая роль дорожно-транспортной сети. По транспортной доступности округа были выделены 6 классов (зон) на основании моделирования (рис. 2, см. цв. вкладку I). Затем в этой же программе рассчитывали процент площади для каждой зоны доступности. По полученным результатам выявлено, что наиболее доступные районы (пройденное расстояние занимает менее 7 мин и от 7 до 14 мин) – это центральная часть населённого пункта (в административном плане) и юго-восточная периферия. По предварительным расчётам площади этих зон составляют приблизительно 30–35%. Среднюю доступность имеет большая часть города (35–40%). Наименее доступными территориями являются южная и юго-западная периферия города, наиболее удалённые от центра г. Видное.

В целом, г. Видное является весьма доступным в отношении общественного транспорта, средний показатель составляет около 20 мин. Это говорит о компактности городской части и хорошей связанности районов. Низкая доступность южной периферии города обусловлена недостаточностью развития дорожно-транспортной сети из-за сравнительно недавней застройки этой территории.

Особое внимание в исследовании было уделено показателям плотности городской инфраструктуры и застройки с делением на 6 и 5 классов соответственно по количеству

дорог и зданий на единицу площади ячейки (400 м) средствами геоинформационного анализа. Расчёты плотностей улично-дорожной сети и застройки показали, что максимальная и близкая к максимальной плотность дорожной сети и, соответственно, высокая антропогенная нагрузка соответствует центральной и отчасти юго-западной части городской территории. Низкую плотность дорожной сети и, следовательно, слабую антропогенную нагрузку имеют периферийные районы г. Видное. Анализируя степень застроенности территории, стоит отметить, что наблюдается увеличение плотности застройки при движении к северу; эта закономерность прослеживается также по оси север-юг (рис. 3, см. цв. вкладку II).

Результаты оценки плотности параметров городской инфраструктуры сравнивали с данными, полученными с использованием геоинформационных технологий, что позволило провести дополнительную оценку фрактальной размерности транспортной инфраструктуры и городской застройки (рис. 4, см. цв. вкладку II). Относительно нагрузки УДС на городской ландшафт (рис. 4, карта 1) выполненные расчёты показали, что «зонами относительного риска» является западная периферия города со значениями  $Df$  от 1,59 до 1,76, что свидетельствует об избытке или чрезмерной нагрузке на городской ландшафт,

а также о неравномерном распределении транспортной сети по этой части города. Распределение транспортной сети в основной части города имеет также фрагментарный характер с колебанием значений фрактальной размерности от 1,16 до 1,4. В среднем, по городу показатель фрактальной размерности равен 1,4, что является оптимальным с точки зрения развитости УДС и антропогенного воздействия на городской ландшафт.

Что касается городской застройки (рис. 4, карта 2), то максимальные показатели  $Df$  соответствуют северной и северо-западной периферии города. Значения варьируют от 1,49 до 1,57, что также, по-видимому, обусловлено преобладанием неравномерно размещённой застройки. Большая часть города принимает более сглаженный диапазон значений, в пределах 1,2–1,27. Средний же показатель  $Df$  равен 1,21, что ближе к оптимуму.

### Заключение

Таким образом, проведённые исследования по геоэкологической оценке г. Видное показали, что его урбогеосистема подвергается существенному антропогенному воздействию и представляет собой достаточно мозаичную картину по распределению антропогенной нагрузки, что влияет, в целом, на геоэкологическую ситуацию города и выбор вариантов планирования и благоустройства при проведении природоохранных мероприятий.

Наибольшее негативное воздействие на природную среду оказывают дорожно-транспортная сеть и интенсивная жилая застройка. Плотность дорожно-транспортной сети в среднем составляет от 4,5 до 8 дорог на 100 м<sup>2</sup>. Плотность жилой застройки варьирует от 8,5 до 15 зданий на 100 м<sup>2</sup>. В связи с этим возрастает роль зелёных зон (комплексов) города, особенно в центральной, наиболее антропогенно преобразованной части города. В районах интенсивной жилой застройки территории города площади зелёных зон значительно сокращаются (до 10% площади в год), что может привести к их дефициту и ухудшению качества природной среды.

Геоинформационные системы и специализированные программы обладают достаточно широкими техническими возможностями в области геоэкологической оценки и моделирования урбогеосистем. Геоэкологическая оценка на их основе позволяет устанавливать дифференциацию территории по различным критериям, оценивать плотность, развитость

компонентов городской инфраструктуры; определять диапазон устойчивости, степень воздействия антропогенной нагрузки на урбогеосистему и разрабатывать конкретные мероприятия по устойчивому экологически безопасному развитию г. Видное.

### Литература

1. Кахраманова Ш.Ш. Моделирование в градостроительстве и экологии // Вестник ТГАСУ. 2012. № 1. С. 28–40.
2. Кочуров Б.И., Хазиахметова Ю.А., Ивашкина И.В., Сукманова Е.А. Ландшафтный подход в градостроительном проектировании // Юг России: экология, развитие. 2018. Т. 13. № 3. С. 71–82.
3. Мандельброт Б. Фрактальная геометрия природы. М.: Институт компьютерных исследований, 2002. 656 с.
4. Иудин Д.И., Чечин А.В., Кащенко О.В. Применение методов фрактального анализа и геоинформационных технологий для анализа дорожной сети урбанизированных территорий // Геоинформатика: Информация и космос. 2014. № 1. С. 84–87.
5. Орлова И.В. Оценка уровня экологической сбалансированности структуры земельных угодий аграрно-развитых регионов Западной Сибири // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. Самара. 2013. Т. 15. № 3 (3). С. 1–6.
6. Turchin P. Evolution in population dynamics // Nature. 2003. No. 424. P. 257–258.
7. Lu Y., Tang J. Fractal dimension of a transportation network and its relationship with urban growth: a study of the dallas-fort worth area // Environment and Planning and Design. 2004. V. 31. P. 895–911.
8. Администрация городского поселения Видное Ленинского муниципального района Московской области. Официальный сайт [Электронный ресурс] [http://vidnoe.adm-vidnoe.ru/?show=o\\_g\\_vidnoe](http://vidnoe.adm-vidnoe.ru/?show=o_g_vidnoe) (Дата обращения: 15.12.2022).
9. Вагин В.С., Шеина С.Г., Чубарова К.Г. Принципы и факторы устойчивого развития городских территорий // Интернет-журнал «Науковедение» 2015. Т. 7. № 3. С. 1–10 [Электронный ресурс] <http://naukovedenie.ru> (Дата обращения: 15.12.2022).
10. Earth Observing System. EOS Crop Monitoring [Электронный ресурс] <https://eos.com/es/ndsi/> (Дата обращения: 12.11.2022).
11. Павлов Ю.В. Фракталы как инструмент территориального планирования агломерационных систем // Фундаментальные исследования. 2013. № 10. С. 2242–2248.
12. Рябова Э.Г. Экологические проблемы малых и средних городов Подмосковья // Проблемы региональной экологии. 2014. № 2. С. 44–47.
13. Приказ об утверждении методики определения индекса качества городской среды муниципальных образований Российской Федерации от 31 октября 2017 г.



№ 1494/пр. [Электронный ресурс] <https://www.consultant.ru/cons/cgi/online.cgi?req=doc&base=LAW&n=282529&dst=1000000001%2C0#09074878626027192> (Дата обращения: 05.01.2023).

14. Битюкова В.Р., Соколова Е.П. Комплексная экологическая оценка территории Бульварного кольца г. Москвы // Информационно-аналитическое издание Москва: оценки специалистов. М.: Изд. Правительства Москвы, 2002. С. 1–32.

15. Copernicus Open Access Hub. The Center of Open Access of Satellite Images [Электронный ресурс] <https://scihub.copernicus.eu/dhus/#/home> (Дата обращения: 10.11.2022).

16. Мовчан М.А. Сравнительная оценка почвенно-растительного покрова по индексам SAVI и NDVI на примере участков Ближнего Подмосковья и Новой Москвы // Материалы Международной научно-практической конференции «Индикация состояния окружающей среды: теория, практика, образование». М.: Первое экономическое издательство, 2022. С. 20–26.

17. Тунакова Ю.А., Новикова С.В., Шагидуллин А.Р., Валиев В.С. Мультифрактальный спектр структуры вариационных рядов наблюдений для интерпретации зонирования территории урбоэкосистемы // Теоретическая и прикладная экология. 2022. № 4. С. 60–64.

18. Беленко В.В. Мониторинг объектов природно-экологического каркаса застраиваемых территорий по материалам космических съёмок // Теоретическая и прикладная экология. 2019. № 3. С. 21–27.

## References

1. Kakhramanova Sh.Sh. Modeling in urban planning and ecology // Vestnik TGASU. 2012. No. 1. P. 28–40 (in Russian).

2. Kochurov B.I., Khaziakhmetova Yu.A., Ivashkina I.V., Sukmanova E.A. Landscape approach in urban planning design // South of Russia: Ecology, Development. 2018. V. 13. No. 3. P. 71–82 (in Russian).

3. Mandelbrot B. Fractal geometry of nature. Moskva: Institut komp'yuternyh issledovaniy, 2002. 656 p. (in Russian).

4. Yudin D.I., Chechin A.V., Kashchenko O.V. Application of fractal analysis methods and geoinformation technologies for the analysis of the road network of urbanized territories // Geoinformatics: Information and space. 2014. No. 1. P. 84–87 (in Russian).

5. Orlova I.V. Assessment of the level of ecological balance of the structure of land in the agro-developed regions of Western Siberia // Izvestiya Samara Scientific Center of the Russian Academy of Sciences. 2013. V. 15. No. 3 (3). P. 1–6 (in Russian).

6. Turchin P. Evolution in population dynamics // Nature. 2003. No. 424. P. 257–258.

7. Lu Y., Tang J. Fractal dimension of a transportation network and its relationship with urban growth: a study of

the dallas-fort worth area // Environment and Planning and Design. 2004. V. 31. P. 895–911.

8. Administration of the urban settlement of Vidnoye of the Leninsky municipal district of the Moscow region. Official website [Internet resource] [http://vidnoe.adm-vidnoe.ru/?show=o\\_g\\_vidnoe](http://vidnoe.adm-vidnoe.ru/?show=o_g_vidnoe) (Accessed: 15.12.2022) (in Russian).

9. Vagin V.S., Sheina S.G., Chubarova K.G. Principles and factors of sustainable development of urban areas // Online journal “Naukovedenie”. 2015. V. 7. No. 3. P. 1–10 [Internet resource] <http://naukovedenie.ru> (Accessed: 15.12.2022) (in Russian).

10. Earth Observing System. EOS Crop Monitoring [Internet resource] <https://eos.com/es/ndsi/> (Accessed: 12.11.2022)

11. Pavlov Yu.V. Fractals as a tool of territorial planning of agglomeration systems // Fundamental Research. 2013. No. 10. P. 2242–2248 (in Russian).

12. Ryabova E.G. Environmental problems of small and medium-sized cities of the Moscow region // Problemy regionalnoj ekologii. 2014. No. 2. P. 44–47 (in Russian).

13. Order on approval of the methodology for determining the urban environment quality index of municipalities of the Russian Federation dated October 31, 2017 No. 1494/пр. [Internet resource] <https://www.consultant.ru/cons/cgi/online.cgi?req=doc&base=LAW&n=282529&dst=1000000001%2C0#09074878626027192> (Accessed: 05.01.2023) (in Russian).

14. Bityukova V.R., Sokolova E.P. Comprehensive environmental assessment of the territory of the Boulevard Ring of Moscow // Informacziionno-analiticheskoe izdanie Moskva: ocenki specialistov. Moskva: Izdatelstvo Pravitelstva Moskvy, 2002. P. 1–32 (in Russian).

15. Copernicus Open Access Hub. The Center of Open Access of Satellite Images [Internet resource] <https://scihub.copernicus.eu/dhus/#/home> (Accessed: 10.11.2022).

16. Movchan M.A. Comparative assessment of the soil and vegetation cover by the SAWI and NDVI indices on the example of the areas of the Near Moscow Region and New Moscow // Indication of the state of the environment: theory, practice, education: Materialy Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferencii. Moskva: Pervoe ekonomicheskoe izdatel'stvo, 2022. P. 20–26 (in Russian). doi: 10.18334/9785912924248.20-26

17. Tunakova Y.A., Novikova S.V., Shagidullin A.R., Valiev V.S. Multifractal spectrum structure of variation series of observations to interpret the zoning of the territory of urban ecosystems // Theoretical and Applied Ecology. 2022. No. 4. P. 60–64 (in Russian). doi: 10.25750/1995-4301-2022-4-060-064

18. Belenko V.V. Monitoring of objects of the natural-ecological framework of the undeveloped territories based on satellite imagery // Theoretical and Applied Ecology. 2019. No. 3. P. 21–27 (in Russian). doi: 10.25750/1995-4301-2019-3-021-027

## Тяжёлые металлы в почвах различных функциональных зон урбанизированных территорий: оценка содержания и экологического риска

© 2023. Т. А. Трифонова<sup>1,2</sup>, д. б. н., профессор,

И. Н. Курочкин<sup>1</sup>, аспирант, Ю. Н. Курбатов<sup>1</sup>, аспирант,

<sup>1</sup>Владимирский государственный университет им. А. Г. и Н. Г. Столетовых, 600000, Россия, г. Владимир, ул. Горького, д. 87,

<sup>2</sup>Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, 119991, Россия, г. Москва, Ленинские горы, д. 1,

e-mail: tatrifon@mail.ru, ivan33vl@yandex.ru, iur.curbatov@gmail.com

С целью анализа загрязнения тяжёлыми металлами урболандшафтов г. Владимира проведён отбор и исследование почвенных образцов. Почвенные образцы проанализированы на содержание свинца, цинка, меди, никеля, марганца, кобальта и хрома. Проведено сравнение полученных показателей с предельно допустимыми концентрациями и фоновыми значениями. Установлены закономерности между близостью исследуемых участков к промышленным предприятиям и концентрацией тяжёлых металлов в почве. Рассчитаны коэффициенты накопления тяжёлых металлов в почвах и выявлены металлы, являющиеся приоритетными загрязнителями с наибольшими показателями коэффициента накопления. При помощи расчёта суммарного показателя накопления тяжёлых металлов территория города дифференцирована по степени опасности. Проведён расчёт таких показателей, как общий индекс загрязнения *PLI*, показатель потенциального экологического риска *PERI*, индекс загрязнения Nemerow (*NPI*). Установлено, что приоритетными загрязнителями являются свинец, мышьяк и цинк. Использование различных расчётных параметров загрязнения позволило выявить более детальную картину пространственного распределения тяжёлых металлов в почвах урболандшафтов, находящихся под влиянием сильной антропогенной нагрузки. Несмотря на имеющиеся различия в расчёте индексов, обнаружена высокая корреляционная зависимость между значениями суммарного показателя загрязнения ( $Z_c$ ), индекса загрязнения Nemerow (*NPI*) и индекса потенциального экологического риска (*PERI*). Степень загрязнения почв различных функциональных зон по показателю потенциального экологического риска и общему индексу загрязнения *PLI* увеличивается в следующем ряду: зоны многоэтажной застройки < зоны зелёных насаждений < зоны транспортной инфраструктуры < зоны малоэтажной застройки < промышленные зоны.

**Ключевые слова:** тяжёлые металлы, функциональное зонирование, загрязнение почв, урбанизированные почвы, антропогенное воздействие, геоинформационные системы.

## Heavy metals in soils of various functional zones of urbanized territories: assessment of the content and environmental risk

© 2023. T. A. Trifonova<sup>1,2</sup> ORCID: 0000-0002-1628-9430<sup>\*</sup>

I. N. Kurochkin<sup>1</sup> ORCID: 0000-0002-0405-2225<sup>\*</sup>, Yu. N. Kurbatov<sup>1</sup> ORCID: 0000-0002-0904-3854<sup>\*</sup>

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

87, Gorkogo St., Vladimir, Russia, 600000,

<sup>2</sup>Lomonosov Moscow State University,

1, Leninskiye Gory, Moscow, Russia, 119991,

e-mail: tatrifon@mail.ru, ivan33vl@yandex.ru, iur.curbatov@gmail.com

In order to analyze heavy metal pollution of urbanized soils of the city of Vladimir, the selection and study of soil samples was carried out. Soil samples were analyzed for lead, zinc, copper, nickel, manganese, cobalt and chromium. The obtained indicators were compared with the maximum permissible concentrations and background values. The regularities between the proximity of the studied sites to industrial enterprises and the concentration of heavy metals in the soil are established. The coefficients of accumulation of heavy metals in soils have been calculated and metals that are priority pollutants with the highest accumulation coefficient have been identified. By calculating the total accumulation index of heavy metals, the territory of the city is differentiated by the degree of danger. The calculation of such indicators as: the general pollution index *PLI*, the indicator of potential environmental risk *PERI*, the Nemerow pollution index (*NPI*). It has been established that lead, arsenic and zinc are priority pollutants. The use of various calculated parameters of pollution allowed us to reveal

a more detailed picture of the spatial distribution of heavy metals in the soils of urban landscapes under the influence of a strong anthropogenic load. Despite the differences in the calculation of the indices, a high correlation was found between the values of the total pollution index ( $Z_c$ ), the Nemerow pollution index ( $NPI$ ) and the potential environmental risk index ( $PERI$ ). The degree of soil contamination of various functional zones according to the indicator of potential environmental risk and the general pollution index  $PLI$  increases in the following series: zones of multi-storey buildings < zones of green spaces < zones of transport infrastructure < zones of low-rise buildings < industrial zones.

**Keywords:** heavy metals, functional zoning, soil pollution, urbanized soils, anthropogenic impact, geoinformation systems.

Снижение качества атмосферного воздуха, поверхностных и подземных вод – прямой результат широкого распространения процессов урбанизации и промышленного производства. К деградации городских почв и зелёных насаждений приводят такие процессы, как активная жилищная застройка, развитие транспортной сети, проведение коммуникаций [1–3].

Почвы урбанизированных территорий требуют особого внимания в части загрязнения тяжёлыми металлами, ввиду того, что они осуществляют важные экологические функции, участвуют в биогеохимических круговоротах, регуляции газового обмена. Причиной аккумуляции различных токсических веществ в поверхностном слое урбанизированных ландшафтов являются в основном выбросы промышленных предприятий и возрастающее количество автотранспорта. Однако буферная способность почв может быть утрачена в течение короткого промежутка времени в результате нерационального использования этой территории [4].

В работах многих авторов подчёркивается, что для урбанизированных почв, характеризующихся слабощелочной или нейтральной реакцией, тяжёлые металлы находятся в форме оксидов или гидроксидов, плохо растворимых в воде, в связи с чем их миграция в почве значительно затруднена [5, 6].

Город Владимир относится к категории населённых пунктов, ранее являющимися многопрофильными крупными промышленными центрами с развитой заводской инфраструктурой различных отраслей промышленности. Однако, начиная с начала 1990-х гг., многие предприятия перепрофилировались, значительно сузили спектр производимой продукции, уменьшили производственные мощности. Многие промышленные предприятия прекратили свою деятельность. Однако в городских почвах наблюдается остаточное загрязнение, несмотря на значительно уменьшившуюся эмиссию тяжёлых металлов посредством сокращения производственной деятельности и снижения количества выбросов загрязняю-

щих веществ в атмосферу. Многолетние данные подтверждают, что на здоровье жителей городов Европейской части России непосредственное влияние оказывает низкое качество атмосферного воздуха, способствуя развитию различных заболеваний [7–9].

При этом на изменение элементного состава почв непосредственное влияние оказывают численность населения и особенности городского ландшафта, а именно: размещение промышленного производства, транспортной сети, селитебных и рекреационных зон [10–13].

Для выявления геохимического состояния и характера загрязнения почв в настоящее время в мире широко применяются различные показатели, как простые (индекс геоаккумуляции  $I_{geo}$ , коэффициент концентрации  $EF$ , индивидуальный индекс загрязнения  $PI$ ), так и комплексные (общий индекс загрязнения  $PLI$ , показатель потенциального экологического риска  $PERI$  и др.) [14, 15].

Целью настоящего исследования являлось проведение оценки загрязнения тяжёлыми металлами урбанизированных почв г. Владимира, анализ пространственного распределения уровня загрязнённости и оценка геохимического состояния почв различных функциональных зон урболандшафтов с использованием нескольких индексов загрязнения.

### Объекты и методы исследования

Исследование почвенного покрова было проведено в г. Владимире, промышленном и административном центре области. Объектом данного исследования являются верхние горизонты городских почв. Почвенный покров города представлен преимущественно трансформированными дерново-подзолистыми почвами [9]. Известно, что для почв урбанизированных территорий характерна размытость почвенных горизонтов, нарушение почвенного профиля, наличие посторонних включений.

Воздушный бассейн города ежегодно подвергается высокой нагрузке из-за газопылевых выбросов промышленных предприятий

и автотранспорта, что подтверждается в исследованиях [16, 17].

Транспортная инфраструктура города представлена двумя основными транспортными артериями. В последние годы введена в эксплуатацию Лыбедская магистраль, строительство которой предусматривало разгрузку автотранспорта от центральной исторической части города, где расширение проезжей части невозможно ввиду исторической застройки и памятников архитектуры. Помимо данных объектов транспортной инфраструктуры, город пронизывают десятки крупных дорог районного и местного значения.

В промышленных зонах г. Владимира было отобрано 8 образцов почв, в рекреационных – 12, в зонах малоэтажной застройки – 7, в зонах многоэтажной застройки – 13, в транспортно-селитебной зоне – 9 образцов.

В рекреационных зонах с относительно хорошо развитым растительным покровом (парки, участки городских зелёных насаждений) преобладают естественные и поверхностно антропогенно-преобразованные почвы. В зонах малоэтажной застройки микроклиматические условия близки к естественным, площадь искусственного покрытия не оказывает сильного влияния на развитие растительного покрова и почвенные характеристики. Искусственная расчленённость рельефа в зонах многоэтажной селитебной застройки является причиной значительного изменения температурного режима, что оказывает непосредственное воздействие на видовой состав и жизнеспособность напочвенной травянистой растительности. Почвы транспортно-селитебной и промышленной зон относятся к глубоко антропогенно-преобразованным. Большая часть промышленных предприятий сконцентрирована в восточной части города.

Оценку загрязнения урбанизированных почв тяжёлыми металлами (ТМ) проводили в три этапа: 1) отбор почвенных образцов и пробоподготовка в соответствии с ГОСТ 14.4.4.02-84; 2) анализ содержания ТМ методом рентгенофлуоресцентной спектроскопии с использованием кристалл-дифракционного спектрометра «Спектроскан МАКС» (погрешность выполненных измерений приведена в таблице 1 в соответствии с «Методикой выполнения измерений массовой доли металлов и оксидов металлов в порошковых пробах методом рентгенофлуоресцентного анализа» М049-П/02); 3) импорт полученных значений и проведение интерполяции с использованием инструментов геоинформационной системы ArcGIS.

Для определения степени загрязнения почв ТМ рассчитан индекс загрязнения (Single Pollution Index), который используется для выявления наличия загрязнения отдельными поллютантами [17, 18]:

$$PI = \frac{C_i}{GB}, \quad (1)$$

где  $PI$  – индекс загрязнения;  $C_i$  – содержание  $i$ -го тяжёлого металла в верхнем горизонте почвы (мг/кг);  $GB$  – фоновое содержание (или кларк в почве)  $i$ -го тяжёлого металла (мг/кг).

Для расчёта совокупной аккумуляции ТМ был рассчитан коэффициент загрязнения  $PLI$  (Pollution Load Index) [19]:

$$PLI = (PI_1 \cdot PI_2 \cdot \dots \cdot PI_n)^{1/n}. \quad (2)$$

Значение  $PLI < 1,0$  свидетельствует об отсутствии загрязнения [19].

Для оценки качества почв отечественными и зарубежными исследователями широко используется индекс загрязнения Nemerow ( $NPI$ ) [2, 19], учитывающий вклад не только каждого загрязняющего вещества, но и потенциальную опасность металла-загрязнителя с наибольшим содержанием. Индекс загрязнения рассчитывается по формуле:

$$NPI = \sqrt{0,5(PI_{\max}^2 + PI_{\text{ave}}^2)} \quad (3),$$

где  $PI_{\max}$  – максимальное значение  $PI$  среди  $n$  металлов,  $PI_{\text{ave}}$  – среднее значение  $PI$ . Согласно показателю  $NPI$ , выделяется пять классов загрязнения почвы:  $NPI < 0,7$  – чистая почва,  $0,7 < NPI < 1,0$  – пограничный уровень,  $1,0 < NPI < 2,0$  – слабое загрязнение,  $2,0 < NPI < 3,0$  – среднее,  $NPI > 3$  – сильное загрязнение [20].

В ходе работы рассчитывали индекс потенциального экологического риска (Potential Ecological Risk Index). Данный индекс всесторонне учитывает уровень токсичности, концентрацию ТМ и их экологическую чувствительность [19, 20],  $PERI$  состоит из трёх модулей – степень загрязнения, фактор токсического воздействия и потенциальный фактор экологического риска. Показатель потенциального экологического риска ( $PERI$ ) рассчитывается по следующей формуле [20–22]:

$$PERI = \sum PI_i \cdot T_i, \quad (4),$$

где  $T_i$  – коэффициент токсичности ТМ. Значение  $PERI < 90$  означает низкий уровень экологической опасности, 90–180 – средний,

180–360 – высокий, 360–720 – очень высокий, > 720 – чрезвычайно высокий [20].

Статистическая обработка полученных данных проведена с помощью инструментов MS Excel.

Картографирование результатов полученных данных и создание интерполированных поверхностей на основе вычисляемых индексов проведено при помощи модуля «Spatial Analyst» ГИС «ArcGIS 10.4».

### Результаты и обсуждение

В ходе исследования нами были определены концентрации ТМ и мышьяка в почвах г. Владимира (табл. 1).

По сравнению с фоновыми значениями, в почвах г. Владимира наблюдаются высокие средние концентрации Pb, As, Zn и Cu. Показатели содержания Ni и Co сравнимы с кларком, а концентрации оксида Mn, Cr и V значительно ниже его.

Значения комплексных показателей загрязнения *PLI* и *NPI* свидетельствуют о зна-

чительной деградации поверхностного слоя городских почв и сильной степени загрязнения ТМ. Максимальные значения показателя потенциального экологического риска характеризуют его как высокий, однако в среднем по городу наблюдается низкий уровень экологической опасности.

Величины коэффициента вариации, полученные при анализе результатов исследования, указывают на однородную степень рассеивания таких металлов, как Cu, Ni, Mn, Cr и V. В то же время наблюдается сильно неоднородная степень рассеивания для Pb и As.

Согласно полученным результатам, наибольшими средними коэффициентами накопления отличаются Pb (6,833), As (2,909) и Zn (2,835). Максимальные значения среднего индекса загрязнения наблюдаются в промышленной зоне (2,787) и в зонах малоэтажной застройки (2,483).

Территориальное распределение суммарного показателя загрязнения на территории г. Владимира выглядит следующим образом

Таблица 1 / Table 1

Тяжёлые металлы и мышьяк в городских почвах г. Владимира (мг/кг)  
Heavy metals and As in urban soils of Vladimir (mg/kg)

Показатель Indicator	Pb	As	Zn	Cu	Ni	Co	MnO	Cr	V
Минимум / Minimum	17,5	2,516	55,98	0,001	15,35	0,001	270,7	53,5	9,41
Максимум / Maximum	338,5	55,91	453,1	91,23	57,53	26,47	1270	210,6	93,58
Среднее / Average	68±31*	12±9	142±28	52±26	37±10	11±6	720±60	87±26	61±19
Медиана / Median	50,02	8,582	109,1	52,53	36,72	11,64	739	81,56	63,07
Стандартное отклонение Standart deviation	58,65	9,47	81,77	16,99	8,61	5,71	208,92	24,03	17,74
Стандартная ошибка Standart error	8,29	1,34	11,56	2,4	1,21	0,8	29,54	3,39	2,5
Коэффициент вариации, % Coefficient of variation	85,84	81,46	57,7	32,84	23,40	50,41	28,94	27,54	29,03
Фоновое содержание (кларк)** Background content (clark)**	10	4	50	20	40	8	750	200	100
ОДК** Approximate permissible concentrations**	130	10	220	132	80	5***	1500***	6***	150***

Примечания: \* – значения погрешностей рассчитаны в соответствии с методикой измерений массовой доли металлов и оксидов металлов в порошковых пробах почв и донных отложений рентгенофлуоресцентным методом М-049-ПДО/18. ФР.1.31.2018.32143; \*\* – фоновые содержания и ОДК указаны в соответствии с СанПиН 1.2.3685-21; \*\*\* – предельно допустимые концентрации.

Notes: \* – the error values were calculated in accordance with the method of measuring the mass fraction of metals and metal oxides in powder samples of soils and bottom sediments by the X-ray fluorescence method M-049-PDO/18. FR.1.31.2018.32143; \*\* – background contents and maximum allowable concentrations are indicated. UEC are specified in accordance with the SanPiN 1.2.3685-21; \*\*\* – the maximum permissible concentrations are indicated.

Таблица 2 / Table 2

Коэффициенты корреляции Пирсона  $r$  между различными показателями загрязнения  
Pearson correlation coefficients  $r$  between different pollution indicators

Показатели Indicators	Значение $r$ / $r$ value	Интерпретация Interpretation	Уровень статистической значимости корреляции The level of statistical significance of correlation
$Z_c$ / $PLI$	0,528	средняя / average	$p = 0,0001$
$Z_c$ / $PERI$	0,974	сильная / strong	$p = 3,2 \cdot 10^{-31}$
$Z_c$ / $NPI$	0,957	сильная / strong	$p = 2,3 \cdot 10^{-26}$
$PLI$ / $PERI$	0,340	умеренная / medium	$p = 0,018$
$PLI$ / $NPI$	0,276	слабая / weak	$p = 0,057$
$PERI$ / $NPI$	0,996	сильная / strong	$p = 3,1 \cdot 10^{-50}$

(рис. 1, см. цв. вкладку III) (цифрами на рисунке 1 и далее обозначены номера участков пробоотбора).

Выделяется три крупных очага со значительным превышением допустимых показателей. Первый, в северо-западной части города (участок отбора № 22), располагается на территории промышленной зоны. К тому же, менее чем в 500 м к северу от данного местоположения, проходит федеральная трасса М-7 «Волга».

Повышенное значение  $Z_c$  в центральной части города (участок № 17), вероятно обусловлено высоким трафиком автомобильного транспорта и значительным техногенным прессингом данной территории. Проходящее рядом Судогодское шоссе, пересекающее р. Клязьма, является крупной региональной трассой, соединяющей областную центр с районными центрами юго-востока Владимирской области. В конце 1950-х гг. эта территория была подвергнута значительному антропогенному вмешательству, для строительства данной трассы был срезан слой грунта около 4–5 м.

Также высокие значения суммарного показателя загрязнения наблюдаются на востоке города (участок № 38), что связано с наличием поблизости нескольких крупных промышленных предприятий. При этом территории, находящиеся к западу от предприятий, не так сильно подвержены загрязнению.

Наиболее напряжённую ситуацию представляет собой загрязнение почв г. Владимира свинцом. Это также подтверждается в исследовании, проведённом в 2019 г. [3]. Предельно допустимая концентрация Pb (32 мг/кг) превышена почти в два раза на значительных площадях, в основном же уровень загрязнения Pb колеблется в пределах 1,2–1,6 ПДК.

Выявлены значимые корреляционные зависимости между рассматриваемыми параметрами (табл. 2).

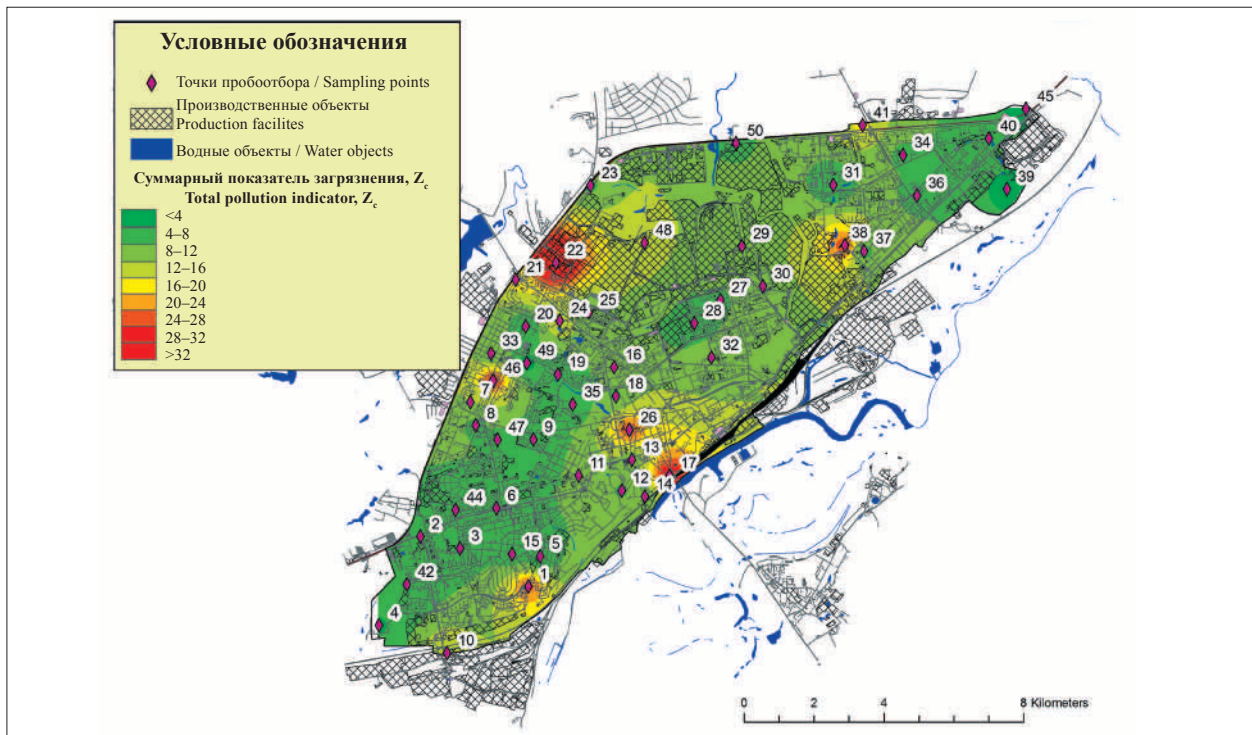
Так, между суммарным показателем загрязнения ( $Z_c$ ) и индексом загрязнения Nemerow ( $NPI$ )  $r = 0,974$ , а между  $Z_c$  и показателем потенциального экологического риска  $r = 0,957$ . Это позволяет не рассматривать детально каждый из данных трёх показателей. В то же время значительной корреляционной зависимости между суммарным показателем загрязнения и коэффициентом загрязнения  $PLI$  не выявлено ( $r = 0,528$ ).

Градации показателей  $PLI$  весьма условна (упоминается лишь, что  $PLI < 1,0$  указывает на отсутствие загрязнения [23]), а максимальные значения данного показателя достигают 2,5. Пространственное распределение  $PLI$ , полученное по результатам математической обработки имеющихся данных, представляет собой следующую картину (рис. 2, см. цв. вкладку III).

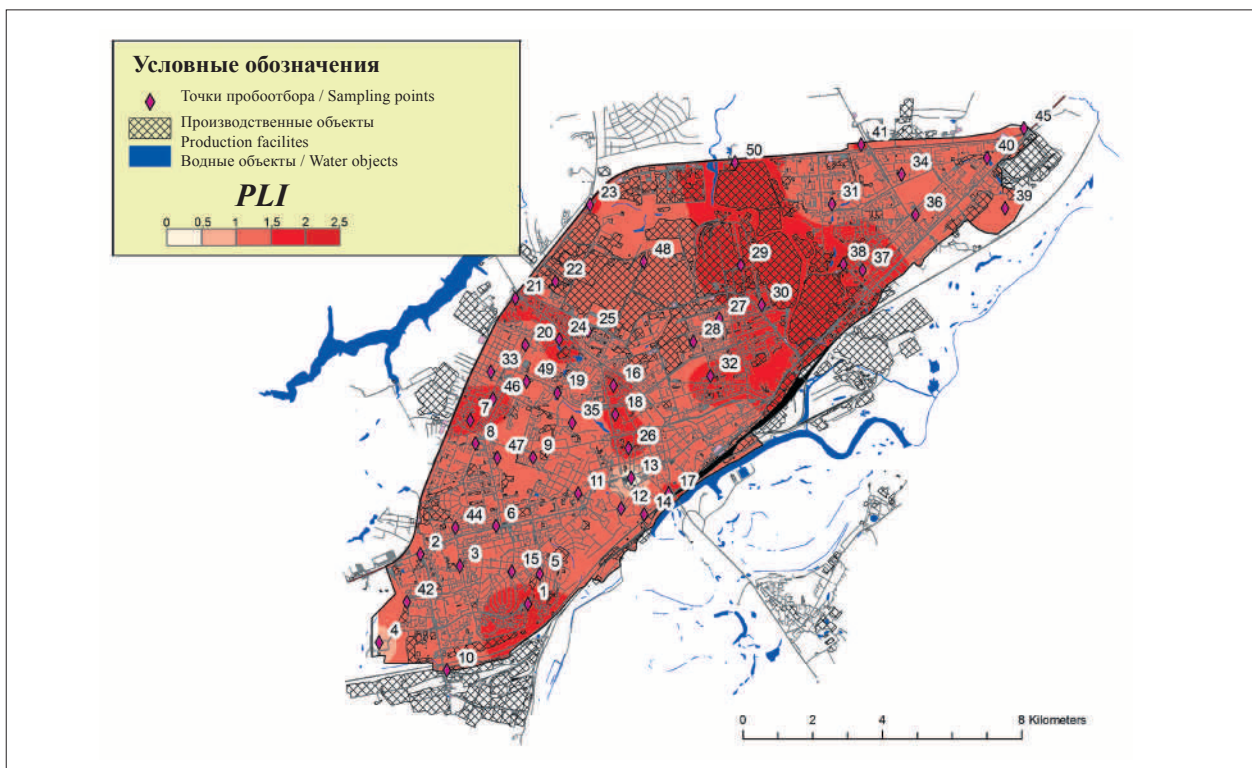
Наибольшие значения коэффициента  $PLI$  (2–2,5) наблюдаются на территории промышленных зон в восточной части города и вдоль федеральной трассы М-7 «Волга». Повышенные значения (1,5–2) на юго-западе города, вероятно, связаны с близостью железнодорожных путей, и техногенной нагрузкой при строительстве новых жилых массивов. Отсутствие загрязнения ( $PLI < 1$ ) зафиксировано лишь на двух участках. Это крайняя юго-западная часть города, представляющая собой селитебную застройку двухэтажными домами (бывший пос. совхоза «Вышка») и небольшой участок территории в историческом центре города – комплекс ландшафтов, относящихся к фрагменту древних владимирских валов домонгольской эпохи. В остальной части города показатель  $PLI$  в основном колеблется от 1 до 1,5.

Почвенные образцы отобраны во всех основных типах функциональных зон города.

**Т. А. Трифонова, И. Н. Курочкин, Ю. Н. Курбатов**  
**«Тяжёлые металлы в почвах различных функциональных зон**  
**урбанизированных территорий: оценка содержания**  
**и экологического риска». С. 38.**

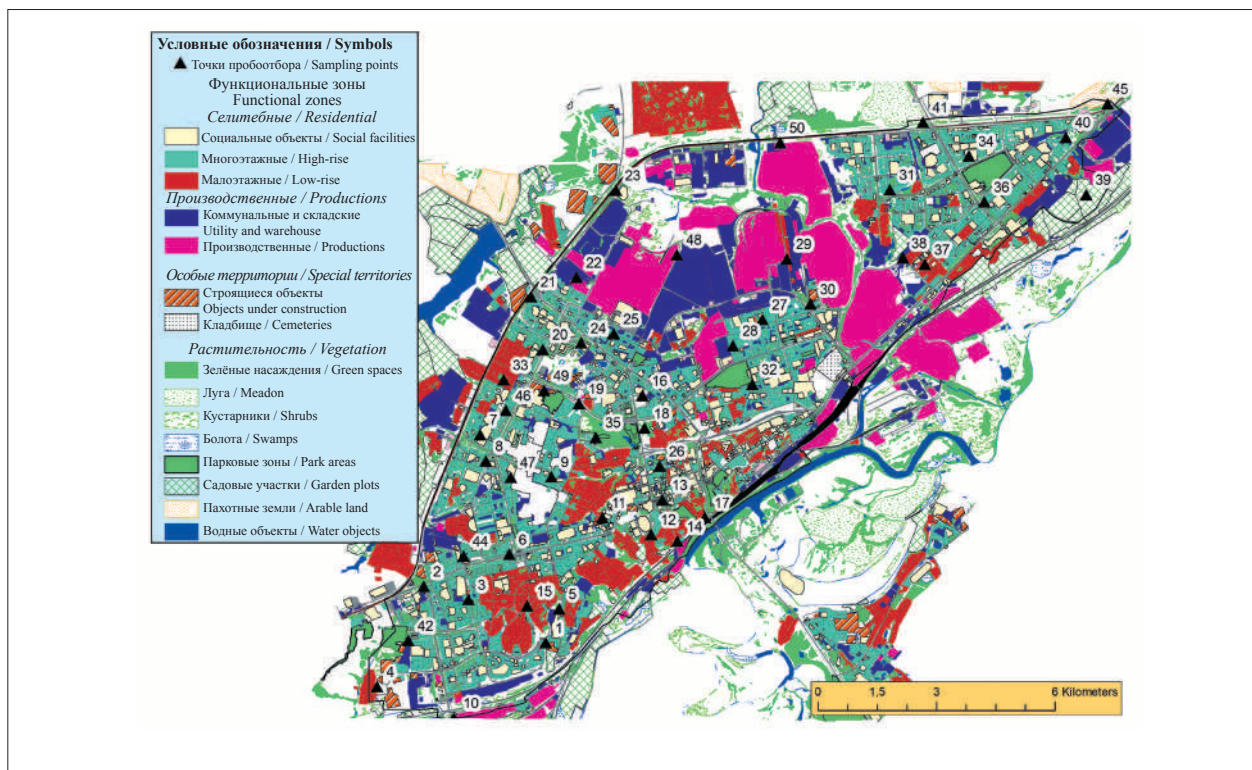


**Рис. 1.** Суммарный показатель загрязнения почв г. Владимира  
**Fig. 1.** Total indicator of soil pollution in Vladimir



**Рис. 2.** Коэффициент загрязнения *PLI* (Pollution Load Index) для почв г. Владимира  
**Fig. 2.** Pollution coefficient *PLI* for Vladimir soils

**Т. А. Трифонова, И. Н. Курочкин, Ю. Н. Курбатов**  
**«Тяжёлые металлы в почвах различных функциональных зон**  
**урбанизированных территорий: оценка содержания**  
**и экологического риска». С. 38.**



**Рис. 3.** Распределение участков отбора по функциональным зонам г. Владимира  
**Fig. 3.** Distribution of selection points by functional zones of Vladimir



Данные, представленные на карте-схеме (рис. 3, см. цв. вкладку IV), позволяют оценить функциональное зонирование города. Так, наибольшую площадь занимают массивы средне- и многоэтажных домов (16,52%). При выделении функциональных зон городских территорий производственные зоны делятся на два типа – 14% занимают коммунальные и складские зоны, расположенные в основном в северной части города, рядом с промышлен-

ными предприятиями, а также на юго-западе и северо-востоке, вдоль железной дороги. Чуть меньшую площадь (13,68%) занимают непосредственно промышленные предприятия.

Зелёные насаждения, представленные в городе как массивами деревьев в жилых зонах, так и газонами, и посадками вдоль дорог, небольшими участками естественной древесной растительности на месте предприятий, прекративших свою производствен-

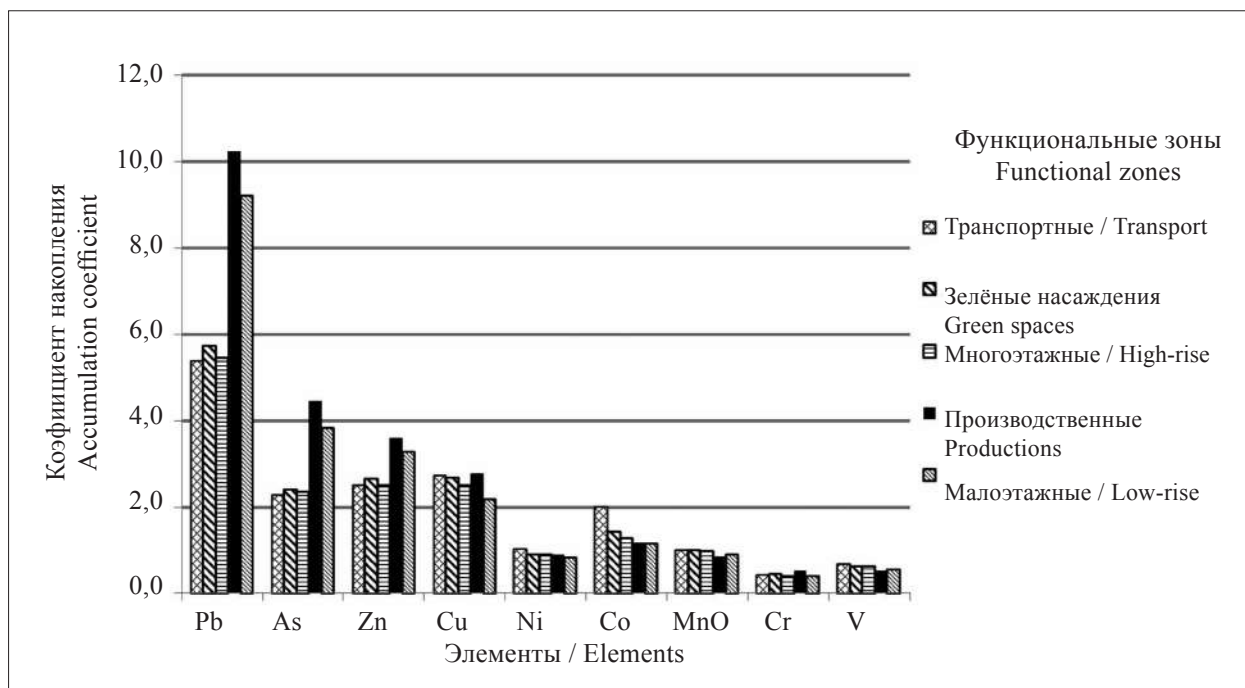


Рис. 4. Коэффициенты накопления тяжёлых металлов и мышьяка в различных функциональных зонах г. Владимира

Fig. 4. Indicators of heavy metals and As accumulation in various functional zones of Vladimir

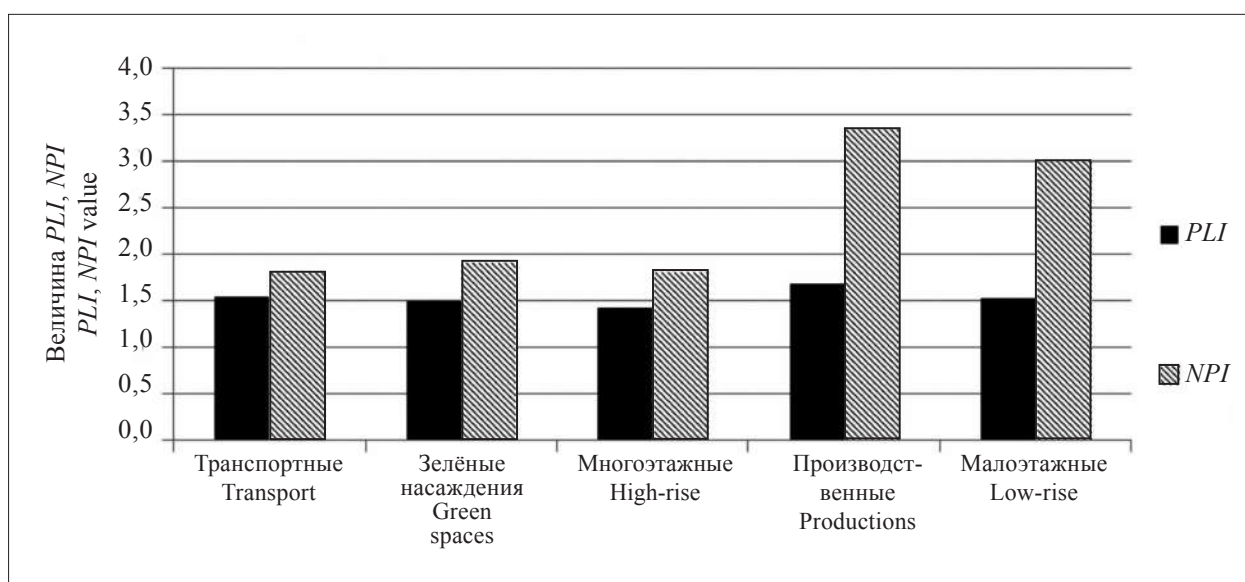


Рис. 5. Показатели NPI и PLI в различных функциональных зонах г. Владимира

Fig. 5. NPI and PLI indicators in various functional zones of Vladimir

ную деятельность, занимают 13,33% площади территории города.

Наибольшими коэффициентами накопления Pb и As характеризуются почвы промзон и малоэтажной застройки (рис. 4). В зонах транспортной инфраструктуры отмечается значительное накопление Co. Хотя Co, как правило, не поступает в больших количествах в окружающую среду, он является одним из опасных загрязнителей, так как потенциально токсичен и является канцерогеном. По уровню фитотоксичности Co занимает третье место среди металлов после Cd и Cu. Для остальных исследуемых тяжёлых металлов значимых различий коэффициентов накопления не выявлено.

Судя по значениям комплексного индекса загрязнения Nemerow (*NPI*) степень загрязнения городских почв возрастает в следующем порядке: зоны транспортной инфраструктуры (1,82, слабое загрязнение) < зоны селитебной многоэтажной застройки (1,83, слабое загрязнение) < зоны зелёных насаждений (1,92, слабое загрязнение) < зона малоэтажной застройки (3,00, среднее загрязнение) < производственные зоны (3,36, сильное загрязнение).

Анализ значений коэффициента загрязнения *PLI* несколько иначе характеризует ситуацию (рис. 5), порядок нарастания загрязнения претерпевает некоторые изменения и выглядит следующим образом: зоны многоэтажной застройки < зоны зелёных насаждений < зоны малоэтажной застройки < зоны транспортной инфраструктуры < производственные зоны.

Разница в порядке нарастания загрязнения для *PLI* и *NPI* заключается в том, что при расчёте *PLI* учитываются лишь средние показатели загрязнения для каждого исследуемого металла; *NPI* же предусматривает включение в расчёт потенциальной опасности металла-загрязнителя с наибольшим содержанием.

Достаточно высокий уровень загрязнения почв в зонах малоэтажной застройки может быть обусловлен сочетанием нескольких факторов. Около 50% домохозяйств в зонах малоэтажной застройки имеют печное отопление, что сказывается на накоплении в почвах угольной пыли, шлака и продуктов сжигания бытового мусора. Также следует обратить внимание, что повсеместно в зимний период городские коммунальные службы для отсыпки дорог и тротуаров используют шлак, который весной с талыми водами попадает на газоны и придомовые участки, загрязняя почву и увеличивая количество пыли в воздухе.

Кроме того, на приусадебных садах и огородах жители зачастую используют широкий ассортимент продукции сельскохозяйственной химии, в которой в виде примесей содержатся ТМ.

Таким образом, следствием отсутствия канализации и централизованного отопления, широкого несбалансированного применения населением удобрений является значительное повышение концентраций ТМ в почвах зон малоэтажной застройки.

В промышленных зонах и зонах транспортной инфраструктуры показатели накопления и рассчитанные индексы также имеют высокие значения, что говорит о большом количестве газопылевых выбросов промышленных предприятий и автомобильного транспорта.

## Заключение

По итогам проведённого анализа показателей концентраций тяжёлых металлов в почвах г. Владимира было подтверждено, что близость промышленных предприятий к жилым массивам влечёт за собой накопление в почвах загрязнителей, которые при высоких концентрациях опасны для здоровья человека.

Использование различных расчётных параметров загрязнения позволило выявить более детальную картину пространственного распределения тяжёлых металлов в почвах урболандшафтов, находящихся под влиянием сильной антропогенной нагрузки. Несмотря на имеющиеся различия в расчёте индексов, обнаружена высокая корреляционная зависимость между значениями суммарного показателя загрязнения ( $Z_c$ ), индекса загрязнения Nemerow (*NPI*) и индекса потенциального экологического риска (*PERI*).

Степень загрязнения почв различных функциональных зон по показателю потенциального экологического риска увеличивается в следующем ряду: зоны многоэтажной застройки < зоны зелёных насаждений < зоны транспортной инфраструктуры < зоны малоэтажной застройки < промышленные зоны.

## Литература

1. Кряжева Е.Ю., Лаптева Е.М., Денева С.В., Холопов Ю.В., Бадулина Н.В., Осадчая Г.Г. Оценка антропогенного загрязнения тяжёлыми металлами и мышьяком почв города Ухта (Республика Коми) // Теоретическая и прикладная экология. 2021. № 2. С. 95–101.

2. Жарикова Е.А. Тяжёлые металлы в городских почвах: Оценка содержания и экологического риска // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. 2021. Т. 332. № 1. С. 164–173.

3. Трифонова Т.А., Чугай Н.В., Кулагина Е.Ю., Курочкин И.Н., Краснощекоев А.Н., Ларионов М.В. Картографирование результатов оценки загрязнения тяжёлыми металлами почв г. Владимира с применением ГИС-технологий // АгроЭкоИнфо. 2020. № 1. С. 1–8.

4. Qian Y., Gallaghe F., Deng Y., Wu M., Feng H. Risk assessment and interpretation of heavy metal contaminated soils on an urban brownfield site in New York metropolitan area // Environmental Science and Pollution Research. 2017. V. 24. P. 23549–23558.

5. Кошелёва Н.Е., Касимов Н.С., Корляков И.Д., Власов Д.В. Влияние застройки на загрязнение городских почв тяжёлыми металлами // Проблемы окружающей среды и природных ресурсов. 2020. № 12. С. 137–144.

6. Новикова Н.С., Довганюк А.И. Оценка степени загрязнения тяжёлыми металлами почв в условиях городской среды // Вестник ландшафтной архитектуры. 2020. № 23. С. 51–54.

7. Савченко О.В., Тюпелев П.А. Особенности микроэлементного статуса у детей, проживающих в районах города с разной степенью загрязнения окружающей среды // Экология человека. 2009. № 1. С. 47–50.

8. Наумов Ю.А., Подкопаева О.В. Особенности, тенденции и последствия загрязнения атмосферы городов Приморского края // Территория новых возможностей. Вестник Владивостокского государственного университета экономики и сервиса. 2013. № 4. С. 155–171.

9. Дорохова М.Ф., Кошелева Н.Е., Терская Е.В. Экологическое состояние городских почв в условиях антропогенного засоления и загрязнения (на примере Северо-Западного округа Москвы) // Теоретическая и прикладная экология. 2015. № 4. С. 16–24.

10. Олькова А.С., Зимонина Н.М., Лялина Е.И., Бобрецова В.Р. Диагностика локального загрязнения урбанизированных территорий в районах автозаправочных станций // Теоретическая и прикладная экология. 2017. № 1. С. 56–62.

11. Экологический атлас бассейна реки Клязьмы: Человек в окружающей среде / Под ред. Т.А. Трифоновой. Владимир: Изд-во ВлГУ, 2018. 312 с.

12. Прокофьева Т.В., Герасимова М.И., Безуглова О.С., Бахматова К.А., Гольева А.А., Горбов С.Н., Жарикова Е.А., Матинян Н.Н., Наквасина Е.Н., Сивцева Н.Е. Введение почв и почвоподобных образований городских территорий в классификацию почв России // Почвоведение. 2014. № 10. С. 1115–1164.

13. Калманова В.Б. Экологический каркас урбанизированных территорий (на примере города Биробиджана) // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. 2016. Т. 18. № 2. С. 385–388.

14. Kowalska J.B., Mazurek R., Gasiorek M., Zaleski T. Pollution indices as useful tools for the comprehensive

evaluation of the degree of soil contamination. A review // Environmental Geochemistry and Health. 2018. V. 40. P. 2395–2420.

15. Tong S., Li H., Wang L., Tudi M., Yang L. Concentration, spatial distribution, contamination degree and human health risk assessment of heavy metals in urban soils across China between 2003 and 2019 – a systematic review // International Journal Environmental Research and Public Health. 2020. V. 17. Article No. 3099.

16. Мищенко Н.В., Краснощекоев А.Н., Трифонова Т.А. Оценка состояния почвенно-растительного покрова промышленного центра с применением геоинформационных технологий // Экология урбанизированных территорий. 2009. № 1. С. 89–95.

17. О состоянии окружающей среды и здоровья населения Владимирской области в 2016 году: ежегодный доклад. Владимир: Транзит-ИКС, 2017. 118 с.

18. Kwon Y.T., Lee C.W. Application of multiple ecological risk indices for the evaluation of heavy metal contamination in a coastal dredging area // The Science of the Total Environment. 1998. V. 214. P. 203–210.

19. Nabholz J.V. Environmental hazard and risk assessment under the United States Toxic Substances Control Act // Sci. Total Environ. 1991. V. 109. P. 649–665.

20. Singh A., Sharma R.K., Agrawal M., Marshall F.M. Health risk assessment of heavy metals via dietary intake of foodstuffs from the wastewater irrigated site of a dry tropical area of India // Food Chem. Toxicol. 2010. V. 48. P. 611–619.

21. Hakanson L. An ecological risk index for aquatic pollution control: A sedimentological approach // Water Research. 1980. V. 14. P. 975–1001.

22. Kowalska J.B., Mazurek R., Gasiorek M., Zaleski T. Pollution indices as useful tools for the comprehensive evaluation of the degree of soil contamination. A review // Environmental Geochemistry and Health. 2019. V. 40. P. 2395–2420.

23. Chen J. Application of improved Nemerow index method based on entropy weight for groundwater quality evaluation // International Journal of Environmental Sciences. 2012. V. 2. P. 212–219.

## References

1. Kryazheva E.Yu., Lapteva E.M., Badulina N.V., Deneva S.V., Kholopov Yu.V., Osadchaya G.G. Assessment of anthropogenic pollution by heavy metals and arsenic in soils of Ukhta city (Komi Republic) // Theoretical and Applied Ecology. 2021. No. 2. P. 95–101 (in Russian). doi: 10.25750/1995-4301-2021-2-095-101

2. Zharikova E.A. Assessment of heavy metals content and environmental risk in urban soils // Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering. 2021. V. 332. No. 1. P. 164–173 (in Russian). doi: 10.18799/24131830/2021/1/3009

3. Trifonova T.A., Chugay N.V., Kulagina E.Yu., Kurochkin I.N., Krasnoshchekov A.N., Larionov M.V.

Mapping of heavy metal pollution assessment results for Vladimir soils using GIS technologies // *AgroEcoInfo*. 2020. No. 1. P. 1–8 (in Russian).

4. Qian Y., Gallaghe F., Deng Y., Wu M., Feng H. Risk assessment and interpretation of heavy metal contaminated soils on an urban brownfield site in New York metropolitan area // *Environmental Science and Pollution Research*. 2017. V. 24. P. 23549–23558. doi: 10.1007/s11356-017-9918-0

5. Kosheleva N.E., Kasimov N.S., Korlyakov I.D., Vlasov D.V. Influence of development on contamination of urban soils with heavy metals in eastern Moscow // *Problemy okruzhayushchey sredy i prirodnykh resursov*. 2020. No. 12. P. 137–144 (in Russian). doi: 10.36535/0235-5019-2020-12-4

6. Novikova N.S., Dovganyuk A.I. Assessment of the degree of heavy metal contamination of soils in an urban environment // *Vestnik landshaftnoy arkhitektury*. 2020. No. 23. P. 51–54 (in Russian).

7. Savchenko O.V., Tyupelev P.A. Features of the microelement status in children lived in city areas with the different degrees of environmental contamination // *Human ecology*. 2009. No. 1. P. 47–50 (in Russian).

8. Naumov Yu.A., Podkopaeva O.V. Features, trends and effects of air pollution to the cities of Primorsky region // *Territoriya novykh vozmozhnostey. Vestnik Vladivostokskogo gosudarstvennogo universiteta ekonomiki i servisa*. 2013. No. 4. P. 155–171 (in Russian).

9. Ecological atlas of the Klyazma River basin / Ed. T.A. Trifonova. Vladimir: VISU, 2018. 312 p. (in Russian).

10. Dorokhova M.F., Kosheleva N.E., Terskaya E.V. Ecological state of urban soils subject to anthropogenic salinization and pollution (the North-Western District of Moscow as a study case) // *Theoretical and Applied Ecology*. 2015. No. 4. P. 16–24 (in Russian). doi: 10.25750/1995-4301-2015-4-016-024

11. Olkova A.S., Zimonina N.M., Lyalina E.I., Bobretsova V.R. Diagnostics of local pollution of urbanized areas in the areas of petrol stations // *Theoretical and Applied Ecology*. 2017. No. 1. P. 56–62 (in Russian). doi: 10.25750/1995-4301-2017-1-056-062

12. Prokof'eva T.V., Gerasimova M.I., Bezuglova O.S. and others. Inclusion of soils and soil-like bodies of urban territories into the Russian soil // *Eurasian Soil Science*. 2014. No. 10. P. 1115–1164 (in Russian). doi: 10.7868/S0032180X14100104

13. Kalmanova V.B. The ecological framework of the urbanized territories (on the example of Birobidzhan city) // *Izvestiya Samarskogo nauchnogo tsentra Rossiyskoy akademii nauk*. 2016. V. 18. No. 2. P. 385–388 (in Russian).

14. Kowalska J.B., Mazurek R., Gasiorek M., Zaleski T. Pollution indices as useful tools for the comprehensive evaluation of the degree of soil contamination. A review // *Environmental Geochemistry and Health*. 2018. V. 40. P. 2395–2420. doi: 10.1007/s10653-018-0106-z

15. Tong S., Li H., Wang L., Tudi M., Yang L. Concentration, spatial distribution, contamination degree and human health risk assessment of heavy metals in urban soils across China between 2003 and 2019 – a systematic review // *International Journal Environmental Research and Public Health*. 2020. V. 17. Article No. 3099. doi: 10.3390/ijerph17093099

16. Mishchenko N.V., Krasnoshchekov A.N., Trifonova T.A. The evaluation of the state of the topsoil in industrial centre performed with the use of geo-informative technologies // *Ekologiya promyshlennykh territoriy*. 2009. No. 1. P. 89–95 (in Russian).

17. On the state of the environment and the health of the population of the Vladimir region in 2016: annual report // Administration of the Vladimir Region, Department of Nature Management and Environmental Protection. Vladimir: Transit-X, 2017. 118 p. (in Russian).

18. Kwon Y.T., Lee C.W. Application of multiple ecological risk indices for the evaluation of heavy metal contamination in a coastal dredging area // *The Science of the Total Environment*. 1998. V. 214. P. 203–210. doi: 10.1016/S0048-9697(98)00069-2

19. Nabholz J.V. Environmental hazard and risk assessment under the United States Toxic Substances Control Act // *Sci. Total Environ*. 1991. V. 109. P. 649–665. doi: 10.1016/0048-9697(91)90218-4

20. Singh A., Sharma R.K., Agrawal M., Marshall F.M. Health risk assessment of heavy metals via dietary intake of foodstuffs from the wastewater irrigated site of a dry tropical area of India // *Food Chem. Toxicol*. 2010. V. 48. P. 611–619. doi: 10.1016/j.fct.2009.11.041

21. Hakanson L. An ecological risk index for aquatic pollution control: A Sedimentological approach // *Water Research*. 1980. V. 14. P. 975–1001. doi: 10.1016/0043-1354(80)90143-8

22. Kowalska J.B., Mazurek R., Gasiorek M., Zaleski T. Pollution indices as useful tools for the comprehensive evaluation of the degree of soil contamination. A review // *Environmental Geochemistry and Health*. 2019. V. 40. P. 2395–2420. doi: 10.1007/s10653-018-0106-z

23. Chen J. Application of improved Nemerow index method based on entropy weight for groundwater quality evaluation // *International Journal of Environmental Sciences*. 2012. V. 2. P. 212–219. doi: 10.6088/ijes.00202030015

## Мониторинг почвенной альгоцианофлоры на техногенной территории

© 2023. Л. В. Кондакова<sup>1,2</sup>, д. б. н., профессор,  
Е. В. Дабах<sup>1,2</sup>, к. б. н., с. н. с.,

<sup>1</sup>Институт биологии Коми научного центра Уральского отделения  
Российской академии наук,  
167982, Россия, г. Сыктывкар, ул. Коммунистическая, д. 28,  
<sup>2</sup>Вятский государственный университет,  
610000, Россия, г. Киров, ул. Московская, д. 36,  
e-mail: ecolab2@gmail.com

Представлены результаты мониторинга высшей растительности и почвенной альгоцианофлоры на территории самозарастающего хранилища жидких отходов после рекультивации. Видовой состав высших растений и альгоцианофлоры на площадках мониторинга зависит от всей совокупности факторов почвообразования: исходной неоднородности субстрата, рельефа, условий увлажнения. Пониженный рельеф и избыточное увлажнение способствуют развитию влаголюбивых видов высших растений, водорослей и цианобактерий; плотность дернины злаков обостряет конкурентные отношения высших растений (монодоминантность) и способствует снижению видового разнообразия микрофототрофов. Доминантами сообществ микрофототрофов на всех площадках являются цианобактерии, составляя 43–47% от видового разнообразия. Отмечено мало видов жёлтозелёных и эустигматофитовых водорослей, чувствительных к техногенному загрязнению. Закономерной связи между загрязнением грунтов, видовым разнообразием растительности и составом альгоцианофлоры не выявлено. Отмечено, что со временем сходство альгоцианофлор на площадках мониторинга возрастает. Максимальные различия в видовом составе водорослей и цианобактерий, выявленные на площадке под моноассоциацией тростника обыкновенного, обусловлены избыточным увлажнением почв в понижении рельефа.

**Ключевые слова:** техногенный ландшафт, хранилище отходов, почвы, растительность, цианобактерии, водоросли.

## Monitoring of soil algocyanoflora in the technogenic territory

© 2023. L. V. Kondakova<sup>1,2</sup> ORCID: 0000-0002-2190-686X  
E. V. Dabakh<sup>1,2</sup> ORCID: 0000-0002-6088-4819

<sup>1</sup>Institute of Biology of Komi Scientific Centre  
of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences,  
28, Kommunisticheskaya St., Syktывkar, Russia, 167982,  
<sup>2</sup>Vyatka State University,  
36, Moskovskaya St., Kirov, Russia, 610000,  
e-mail: ecolab2@gmail.com

The results of monitoring higher vegetation and soil algocyanoflora on the territory of the self-overgrowing liquid waste storage facility after reclamation are presented. The species composition of higher plants and algocyanoflora on monitoring sites depends on the whole complex of soil formation factors: the initial heterogeneity of the substrate, topography, and moisture conditions. Reduced relief and excessive moisture contribute to development of moisture-loving species of higher plants, algae and cyanobacteria; the density of grass sod exacerbates the competitive relations of higher plants (monodominance) and contributes to decrease in the species diversity of microphototrophs. For the entire observation period from 2019 to 2022 66 species were identified on the territory of the backfilled tailing dump including: Cyanobacteria – 29; Chlorophyta – 20; Xanthophyta – 5; Eustigmatophyta – 3; Bacillariophyta – 9. Cyanobacteria (CB) dominate the algocyanoflora communities at all sites accounting for 43–47% of the species diversity. Few species of yellow-green and eustigmatophyte algae sensitive to technogenic pollution have been noted. The research did not reveal any regular relationship between soil pollution, vegetation species diversity and algocyanoflora composition. However, it can be assumed that the increased content of nitrates in soils in the low area under reed thickets may be the reason for the low species diversity of CB. Over time, increasing similarity of algocyanoflora on the monitoring sites was noted. The maximum difference in the species composition of algae and CB identified on the site under the monoassociation of common reed is conditioned by excessive soil moisture in the lowering of the relief.

**Keywords:** technogenic landscape, waste storage, soils, vegetation, cyanobacteria, algae.

Почвенные фототрофные микроорганизмы являются объектами, чутко реагирующими на изменения окружающей среды, находят широкое применение в целях биомониторинга и биоремедиации почв [1]. Водоросли и цианобактерии (ЦБ) обеспечивают начальные этапы формирования почв на участках суши, вновь образовавшихся в результате природных экзогенных процессов, а также на территориях антропогенного происхождения [2–4]. Первым этапом естественного зарастания золы, шлама, минеральных субстратов является поселение водорослей. Замечено, что на всех изучаемых субстратах группировки водорослей формировались постепенно. Первыми развивались одноклеточные зелёные водоросли-убиквицы и азотфиксирующие ЦБ. В условиях отсутствия органического вещества азотфиксирующие прокариоты, автотрофные по усвоению азота и углерода, имеют особое значение [5–6]. Видовой состав водорослей и ЦБ в почвах зависит от типа почвы и от растительности, имеет значение степень проективного покрытия растений, морфологические и биохимические характеристики растений-доминантов. Снижение видового разнообразия микрфототрофов и изменение таксономической структуры сообществ по сравнению с природным аналогом – показатели загрязнения почвы. Сравнительное изучение видового состава фототрофных микроорганизмов почв природных, урбанизированных и техногенных экосистем выявило общую закономерность: в альго-цианобактериальных комплексах наиболее загрязнённых почв происходит перераспределение таксонов в пользу цианобактерий [1].

Цель работы – мониторинг видового состава альгоцианофлоры для выявления особенностей её развития в почвах на разных по составу и свойствам субстратах, использованных для засыпки хранилища жидких отходов химического производства.

### Объекты и методы исследования

Исследования проводили на северо-востоке Европейской части России в подзоне дерново-подзолистых почв южной тайги в долине реки Вятки. На окраине г. Кирово-Чепецка (Кировская область) сосредоточено несколько предприятий химической промышленности и расположены хвостохранилища твёрдых и жидких отходов. Одно из хранилищ жидких отходов было ликвидировано в 2012 г., котлован был засыпан

грунтом и твёрдыми отходами производства: песком, глиной, гипсом, известью. В 2019 г. на этой территории были заложены 4 площадки мониторинга, в 2021 г. – 5-я площадка. В течение 4 лет на площадках мониторинга описывали растительность, отбирали образцы почв и растений.

Почвы на площадках отличались по гранулометрическому составу: на 1-й площадке субстрат был представлен песком с примесью гальки, на 2-й – суглинком, на 3-й – щебнисто-суглинистым карбонатным материалом, на 4-й – гипсовой коркой. Пятая площадка покрыта песком, находится в понижении рельефа, испытывает переувлажнение (табл. 1). Объектом исследования были смешанные почвенные образцы, составленные из 5 индивидуальных проб, отобранных на площадках мониторинга. В почвах определяли следующие показатели – рН в водной и солевой вытяжках, обменный аммоний, нитратный азот, органическое вещество, подвижные соединения фосфора и калия по общепринятым методикам.

Отбор почвенных проб для альгологического анализа осуществляли в 2019–2022 гг. Пробы отбирали с глубины 0–5 см, средняя проба составлялась из пяти индивидуальных проб. Видовой состав альгофлоры определяли методом прямого микроскопирования почвы и постановкой чашечных культур со стёклами обрастания [7].

Идентификацию водорослей и цианобактерий проводили по сериям отечественных и зарубежных определителей. Названия видов приведены в соответствии с [8]. Сравнение альгоцианофлоры на площадках мониторинга проводили с использованием коэффициента Жаккара ( $K_j = c/a + b - c$ , где  $c$  – число общих видов,  $a$ ,  $b$  – число видов первой и второй флоры) [9].

### Результаты и обсуждение

Наиболее значимые отличия морфологических свойств почв, отмеченные на площадках мониторинга, особенности их химического состава представлены в таблице 1. Более подробно характеристика почв приведена в [10, 11]. Почвы на площадках мониторинга отличаются от окружающих луговых почв нейтральной и щелочной реакцией, наиболее низкие значения рН (6,2) отмечаются в солевой вытяжке из мелкозёма органоминерального слоя на площадке 5, характеризующейся избыточным увлажнением. Содержание органического вещества в почвах невысокое, за исключением органогенных горизонтов на

Таблица 1 / Table 1

Особенности почв и растительности на площадках мониторинга  
Properties of soils and vegetation at monitoring sites

Особенности компонентов биоценоза Features of the components of the biocenosis	Площадки мониторинга почв и растительности / Soil and vegetation monitoring sites				
	1	2	3	4	5
Морфологические особенности почв Morphological features of soils	супесь	красно-бурый суглинок	супесь, подстилаемая карбонатным суглинком	гипсовая корка	супесь
	сухая, бесструктурная	мелкокомковатая структура	глубина подстилания сильно варьирует	на поверхности рыхлый светло-бурый слой выветрелой части корки	на поверхности слой слабозложившихся органических остатков, ниже минеральная толща серосизого цвета
Особенности химического состава почв Features of the chemical composition of soils	щелочная реакция $pH_{H_2O}$ от 6,7 до 8,2, слабое подкисление верхних органогенных слоёв				
	C – 0,81%	C – 1,65%	C – 4,6%	C – 1,56%	C – 5%
	–	As – 10,1 мг/кг	Sr – 397–1150 мг/кг, $NO_3^-$ – 520 мг/кг	Sr – 379 мг/кг	–
Особенности растительного покрова Vegetation features	ПП 60–70%	ПП 85%	ПП 100%	ПП 40%	ПП 100%
	неустойчивая растительная ассоциация		устойчивая пырейная ассоциация	пионерная группировка, неустойчивая	устойчивая гидрофильная группировка тростника обыкновенного

Примечание: ПП – проективное покрытие; «–» – превышений ПДК или фоновых концентраций не выявлено.  
Note: ПП – projective cover, “–” – no excess of MPC or background concentrations was detected.

3-й и 5-й площадках. На почвообразование оказывают влияние близко залегающие к поверхности загрязнённые подземные воды, в составе которых отмечались повышенные концентрации ионов азотной группы, стронция, натрия, магния, марганца, брома [12]. В почвах на 3-й площадке выявлены повышенные концентрации нитратного азота (510 мг/кг) и стронция (1150 мг/кг). В корнеобитаемом слое на 4-й площадке содержание стронция (379 мг/кг) также более чем в 2 раза превышает фоновые показатели (118 мг/кг), на 5-й площадке – оно составляет 190 мг/кг. В почве на 2-й площадке, отличающейся более тяжёлым гранулометрическим составом, выявлено превышающее ОДК содержание мышьяка (10,1 мг/кг), отмечены повышенные по сравнению с региональным фоном, но не превышающие ПДК (ОДК) концентрации меди, цинка, никеля [12].

За четырёхлетний период мониторинга доминирующие виды высших растений на площадках сохранялись с небольшими изменениями.

Особенности растительного покрова представлены в таблице 1. В 2022 г. проективное покрытие (ПП) составляло от 40% на 4-й площадке с гипсовой коркой, до 100% – на 3-ей и 5-й площадках. В составе фитоценоза на 1-й площадке, как и в прошлые годы, доминировал вейник наземный (*Calamagrostis epigeios*), однако впервые в составе доминантов отмечен бедренец-камнеломка (*Pimpinella saxifraga* L.) (табл. 2). На 2-й и 3-й площадках доминирует пырей ползучий (*Agropyron repens*), на 4-й – *C. epigeios*, на 5-й – тростник обыкновенный (*Phragmites communis*). Если на 3-й площадке сформировалась устойчивая моноассоциация пырея ползучего, то на 2 площадке состав доминантов резко изменил-

Таблица 2 / Table 2

Доминирующие виды растений на площадках мониторинга  
Dominant plant species on monitoring sites

№ площадки Site number	Год Year	Виды-доминанты растительного сообщества Dominant species of the plant community
1	2019	<i>Calamagrostis epigeios</i> (L.) Roth
	2020	<i>C. epigeios</i> (L.) Roth, <i>Melilotus albus</i> Desr.
	2021	<i>C. epigeios</i> (L.) Roth
	2022	<i>C. epigeios</i> (L.) Roth, <i>Pimpinella saxifrage</i> L.
2	2019	<i>Melilotus albus</i> Desr., <i>M. officinalis</i> (L.) Lam., <i>Agropyron repens</i> Beauv.
	2020	<i>A. repens</i> Beauv.
	2021	
	2022	<i>A. repens</i> Beauv., <i>Lathyrus pratensis</i> L.
3	2019	<i>A. repens</i> Beauv.
	2020	
	2021	
	2022	
4	2019	<i>A. repens</i> Beauv., <i>C. epigeios</i> (L.) Roth
	2020	<i>C. epigeios</i> (L.) Roth
	2021	
	2022	
5	2021	<i>Phragmites communis</i> Trin.
	2022	

Таблица 3 / Table 3

Видовое разнообразие водорослей и ЦБ на площадках мониторинга в 2019–2022 гг.  
Number of algae and CB species at monitoring sites in 2019–2022

Отделы Divisions	Год Year	Количество видов / Number of species						
		№ площадки мониторинга site number					всего видов total species	
		1	2	3	4	5	ед. / units	%
Cyanobacteria	2019	12	7	8	4	–	16	44
	2020	11	12	3	4	–	15	48
	2021	15	4	1	2	14	30	47
	2022	14	6	9	9	11	23	43
Chlorophyta	2019	3	6	11	5	–	12	33
	2020	5	5	5	3	–	9	29
	2021	9	3	4	10	4	18	28
	2022	6	4	4	8	6	14	26
Xanthophyta+Eystigmatophyta	2019	0	1	2	0	–	3	8
	2020	1	1	0	0	–	2	6
	2021	4	0	0	0	3	8	12
	2022	1	4	5	3	1	7	13
Bacillariophyta	2019	2	4	2	0	–	5	13
	2020	4	5	1	0	–	5	16
	2021	4	3	2	0	6	7	11
	2022	3	4	3	0	8	9	17
Всего видов на участке Total species on the site	2019	17	18	22	9	–	36	100
	2020	21	23	9	7	–	31	100
	2021	32	10	7	12	27	63	100
	2022	24	18	21	20	26	53	100

Примечание: «–» – отсутствие данных.  
Note: “–” – no data.



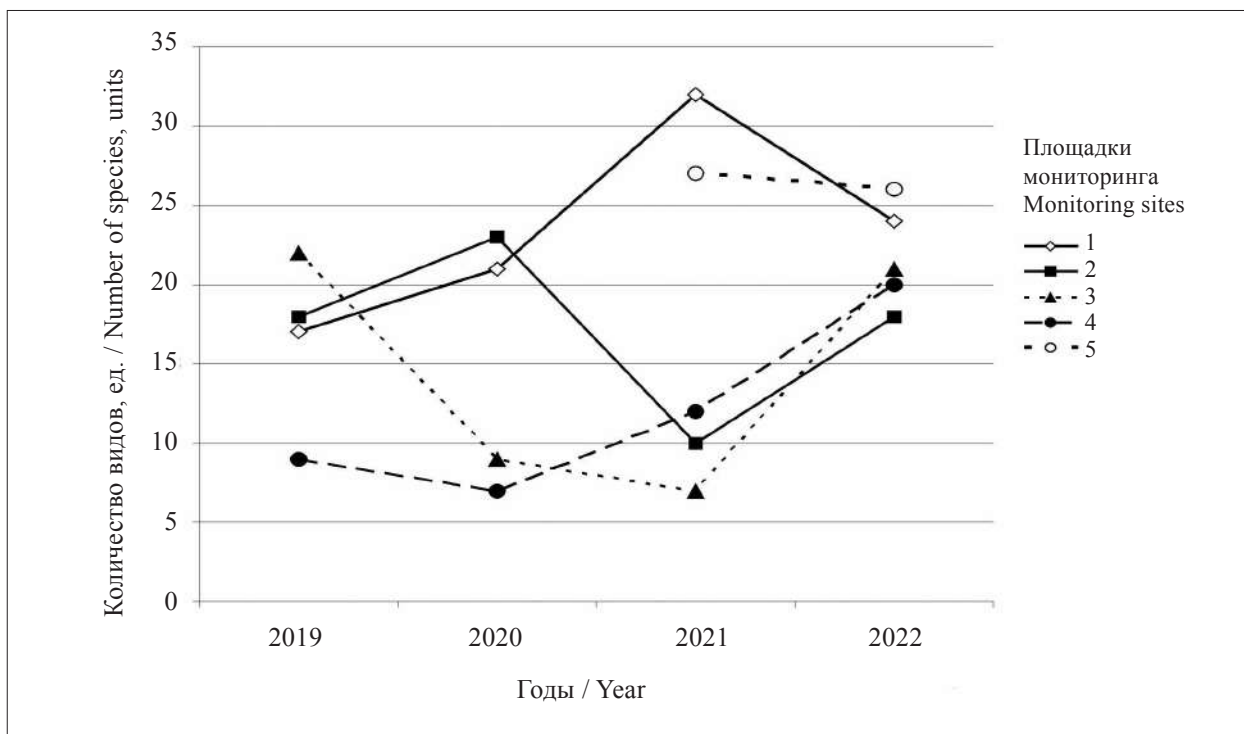


Рис. 1. Динамика видового разнообразия почвенной альгоцианофлоры по годам наблюдений  
 Fig. 1. Changes in species diversity of soil algacyanoflora over the years of observation

ся в 2020 г., а в 2022 г. рядом с ассоциацией пырея ползучего (*Agropyron repens*) развилась куртина чины луговой (*Lathyrus pratensis* L.). Тростник обыкновенный на 5-ой площадке также сформировал моноассоциацию, которая наблюдается с 2020 г. (табл. 2).

За период наблюдений на участках мониторинга выявлено 66 видов почвенных микрорототрофов, в том числе: Cyanobacteria – 29; Chlorophyta – 20; Xanthophyta – 5; Eustigmatophyta – 3; Bacillariophyta – 9 (табл. 3, рис. 1). По видовому разнообразию преобладают ЦБ: от 15 видов в 2019 г. до 30 – в 2021 г., составляя 43–47% от видового разнообразия. ЦБ и водоросли обеспечивают начальные этапы формирования почв при зарастании отвалов, при этом ведущая роль в этом процессе принадлежит ЦБ.

Альгофлора представителей отдела Chlorophyta составляла 26–33% видового разнообразия. Согласно зональному распределению альгофлоры, зелёные водоросли в природных экосистемах лесной зоны по числу видов являются преобладающими [13]. В антропогенных экосистемах они проявляют устойчивость к подкислению почвы, загрязнению её тяжёлыми металлами, нефтью, некоторыми нефтепродуктами, поверхностно-активными веществами [14].

Отмечено мало видов жёлтозелёных (8,4%) и эустигматофитовых водорослей

(4,2%), чувствительных к техногенному загрязнению.

За всё время наблюдений с 2019 по 2022 гг. наибольшее число видов отмечено на площадке № 1 на бедном по составу супесчаном субстрате – 49 видов (табл. 4). Заселение данной территории идёт постепенно, за период наблюдений число видов увеличилось более чем в два раза. По числу видов преобладают ЦБ (43,9%). Из гетероцистных ЦБ отмечены 5 видов, 17 видов – безгетероцистные ЦБ, в основном представители родов *Phormidium* и *Leptolyngbya*.

На площадке № 2 за период наблюдений разнообразие видов альгофлоры сначала несколько возросло с 18 до 23 видов, а затем уменьшилось до 10. Вероятно, это связано с развитием плотной злаковой ассоциации (*Calamagrostis epigeios* (L.) Roth, *Agropyron repens* Beauv.), оказавшей влияние на условия среды: световой режим и влажность. Доминантами альгофлоры в 2022 г. были *Hantzschia amphioxys*, *Nitzschia palea* и *Navicula pelliculosa* (табл. 5).

Плотная дернина, созданная *Agropyron repens* на площадке № 3, негативно отразилась на развитии водорослей. В 2021 г. было выявлено всего 7 видов микрорототрофов, доминировала диатомовая водоросль *Hantzschia amphioxys*. В 2022 г. на периферии площадки № 3 сформировалась вторая ассоциация выс-

Таблица 4 / Table 4

Количество видов водорослей и цианобактерий на площадках мониторинга за весь период наблюдений с 2019 по 2022 гг.  
The number of algae and cyanobacteria species on monitoring sites for the entire observation period from 2019 to 2022

Отделы Divisions	Количество видов The total number of species found						
	№ площадки мониторинга monitoring site No.					всего видов the total number of species	
	1	2	3	4	5	ед. / units	%
Суанобактерия	24	15	10	7	14	29	43,9
Chlorophyta	15	13	13	14	7	20	30,3
Xanthophyta+Eydstigmatophyta	5	4	4	3	3	8	12,1
Bacillariophyta	5	5	4	0	7	9	13,7
Всего видов на участке The total number of species on the site	49	37	31	24	31	66	100

Таблица 5 / Table 5

Доминирующие виды альгоцианофлоры  
Dominant species of algaecyanoflora

№ площадки Site No.	Доминирующие виды альгофлоры в 2019 г. Dominant species of algaeflora in 2019	Доминирующие виды альгофлоры в 2020 г. Dominant species of algaeflora in 2020	Доминирующие виды альгофлоры в 2021 г. Dominant species of algaeflora in 2021	Доминирующие виды альгофлоры в 2022 г. Dominant species of algaeflora in 2022
1	<i>Nostoc punctiforme</i> , <i>Leptolyngbya foveolarum</i> , <i>L. angustissima</i> , <i>Klebsormidium rivulare</i>	<i>Microcoleus vaginatus</i> , <i>Phormidium autumnale</i> , <i>P. formosum</i> , <i>Leptolyngbya foveolarum</i> , <i>Luticola mutica</i>	<i>Nostoc punctiforme</i> , <i>Leptolyngbya foveolarum</i> , <i>Phormidium autumnale</i> , <i>Luticola mutica</i>	<i>Leptolyngbya foveolarum</i> , <i>L. angustissima</i> , <i>Nostoc punctiforme</i> , <i>N. paludosum</i>
2	<i>Phormidium autumnale</i> , <i>Nitzschia palea</i>	<i>Leptolyngbya angustissima</i> , <i>Nitzschia palea</i> , <i>Navicula pelliculosa</i>	<i>Hantzschia amphioxys</i> , <i>Navicula pelliculosa</i>	<i>Leptolyngbya angustissima</i> , <i>Nitzschia palea</i> , <i>Hantzschia amphioxys</i> , <i>Navicula pelliculosa</i>
3	<i>Phormidium autumnale</i> , <i>Chlorococcum infusionum</i> , <i>Stichococcus minor</i> , <i>Hantzschia amphioxys</i>	<i>Hantzschia amphioxys</i>	<i>Hantzschia amphioxys</i>	<i>Hantzschia amphioxys</i> , <i>Luticola mutica</i> , <i>Phormidium autumnale</i>
4	<i>L. angustissima</i> , <i>Nostoc punctiforme</i>	<i>Nostoc punctiforme</i> , <i>N. paludosum</i> , <i>Leptolyngbya angustissima</i>	<i>L. angustissima</i> , <i>Nostoc punctiforme</i> , <i>Klebsormidium rivulare</i>	<i>Phormidium autumnale</i> , <i>Nostoc punctiforme</i> , <i>N. paludosum</i> , <i>Klebsormidium flaccidum</i>
5	нет данных <i>no data</i>	нет данных / <i>no data</i>	<i>Phormidium uncinatum</i> , <i>P. inundatum</i> , <i>Leptolyngbya foveolarum</i>	<i>Nitzschia palea</i> , <i>Phormidium uncinatum</i> , <i>P. inundatum</i>

Таблица 6 / Table 6

Коэффициенты Жаккара (%) в 2019 и 2022 гг.  
Jaccard coefficients (%) in 2019 and 2022

№ площадки / Site No.	1	2	3	4	5
1		40	30	24	–
2	<b>51</b>		32	23	–
3	<b>51</b>	<b>58</b>		41	–
4	<b>41</b>	<b>42</b>	<b>57</b>		–
5	<b>36</b>	<b>33</b>	<b>32</b>	<b>20</b>	

Примечание «–» – отсутствие данных; жирным шрифтом выделены данные 2022 г.  
Note: “–” – no data; data of 2022 is highlighted in bold.

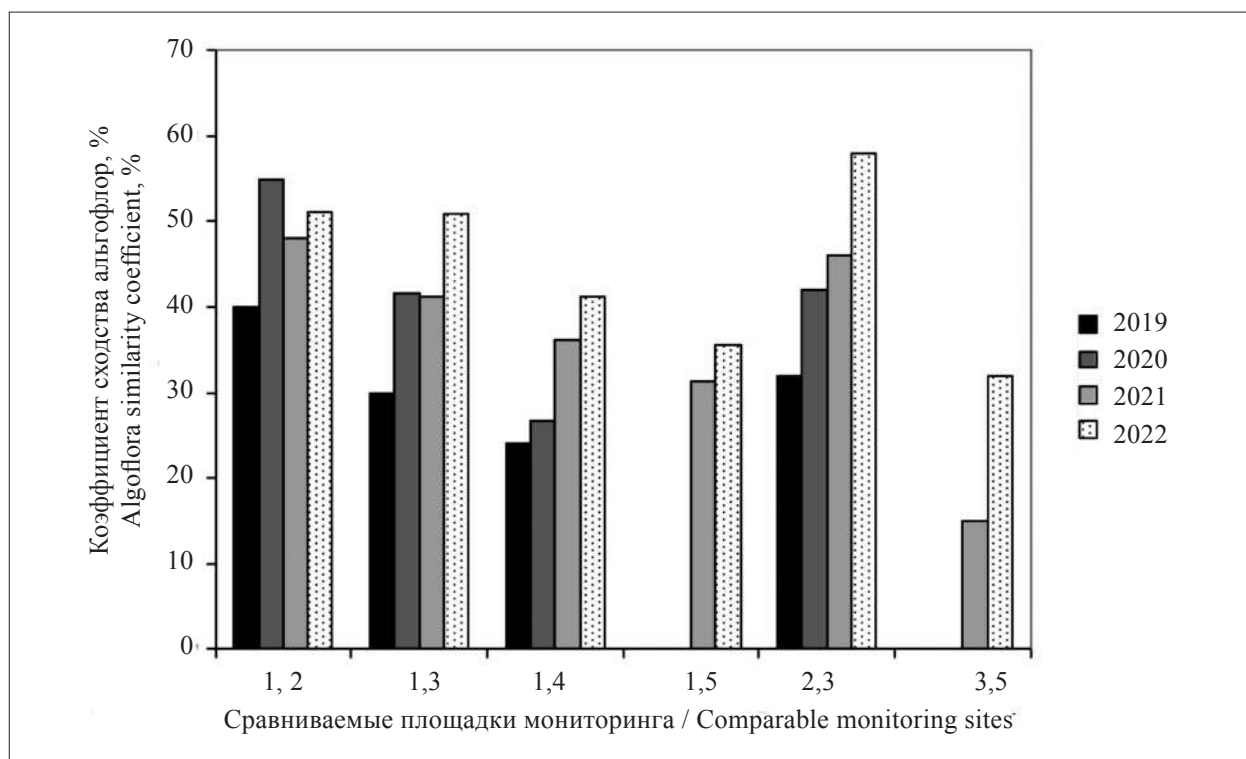


Рис. 2. Коэффициенты сходства альгоцианофлор по годам наблюдений  
Fig. 2. Coefficients of similarity of algal cyanofloras by years of observation

ших растений – *Lathyrus pratensis* L., под которой видовое разнообразие микрофототрофов увеличилось до 21 вида, а доминантами являлись *Hantzschia amphioxys*, *Luticola mutica*, *Phormidium autumnale*. Приуроченность диатомовых водорослей к дерновинам злаков взаимно обусловлена потребностью в достаточном количестве кремния [15]. За всё время наблюдений на этой площадке выявлено наименьшее количество видов ЦБ по сравнению с другими площадками, заложенными на рыхлых грунтах (1, 2 и 5), что, возможно, обусловлено повышенным содержанием нитратного азота в почвах. Известно, что с увеличением концентрации в почве доступных форм азота уменьшается конкурентоспособность ЦБ, для

которых при нормальном ходе сезонной сукцессии в конце лета и осенью характерно доминирование в сообществе микрофототрофов [16].

На площадке № 4 (гипсовая корка) наблюдается медленное увеличение видового разнообразия микрофототрофов. Видовой состав ЦБ за период наблюдений стабилен, в два раза возросло число видов зелёных водорослей.

На 5-й площадке сформировалась плотная ассоциация тростника (*Phragmites communis*). Доминантами сообществ альгоцианофлоры являлись ЦБ, представленные безгетероцистными и гетероцистными формами. Из видов индикаторов повышенной влажности также отмечены: *Oscillatoria limosa*, *Gloeocapsa* sp. (ЦБ),

*Cosmarium* sp., *Microthamnion kuetzingianum* (Chlorophyta), *Nitzschia palea* (Bacillariophyta).

В составе доминирующих видов (табл. 5), как и в составе всей альгоцианофлоры участков, преобладают ЦБ.

Коэффициенты флористической связи (коэффициенты Жаккара) свидетельствуют о высоком и возрастающем с годами сходстве альгофлор на 2-й и 3-ей площадках мониторинга, в 2022 г. он достигал 58% (табл. 6).

Значения коэффициентов сходства альгоцианофлор на некоторых площадках и их изменение за 4 года наблюдений графически представлено на рисунке 2.

В 2022 г. этот показатель составляет 51% для 1-й и 2-й, а также 1-й и 3-й площадок, что позволяет сделать вывод о сближении видового разнообразия альгоцианофлор со временем независимо от растительности и характера почвообразующего субстрата. Причём по мере выветривания гипсовой корки альгоцианофлора на площадке № 4 становится всё более сходной с альгоцианофлорой на 3-й площадке. Наиболее отличается от остальных видовой состав альгоцианофлоры на 5-й площадке. По-видимому, избыточное увлажнение и дефицит света в зарослях тростника – главные факторы, определяющие состав водорослей и ЦБ на этом участке.

Таким образом, на территории хвостохранилища жидких отходов после рекультивации происходит формирование альгогруппировок микрофототрофов в соответствии с условиями среды. Исходная неоднородность субстрата и растительности обуславливает различия видового состава водорослей и ЦБ. По результатам мониторинга выявлены следующие особенности в распространении почвенных водорослей и цианобактерий:

– доминантами сообществ на всех площадках являются цианобактерии – организмы, завершающие сезонную сукцессию микрофототрофов и являющиеся толерантными к техногенному воздействию;

– состав доминирующих видов альгоцианофлоры зависит от всей совокупности факторов почвообразования. Пониженный рельеф и избыточное увлажнение способствуют развитию влаголюбивых видов высших растений, водорослей и ЦБ; плотность дернины злаков обостряет конкурентные отношения высших растений, приводит к монодоминантности и способствует снижению видового разнообразия микрофототрофов;

– развитие злаковых ассоциаций на площадках 2 и 3 сопровождается доминировани-

ем диатомовых водорослей, использующих кремний, которым богаты растения семейства злаковых;

– чёткой закономерной связи между загрязнением грунтов и видовым разнообразием, а также составом альгоцианофлоры не выявлено, что, по-видимому, обусловлено невысоким содержанием загрязняющих веществ в верхнем слое почв, так как источником загрязнения являются подземные воды. Повышенные концентрации биогенных элементов (2ПДК нитратов в поверхностном слое почвы на площадке № 3) благоприятно влияют на развитие высших растений, формируя в большей степени зависимость почвенной альгоцианофлоры от проективного покрытия растений (света) и химического состава отмирающей растительной массы, чем от загрязнённых грунтов. При этом возможно, что именно высокое содержание доступного азота обуславливает относительно малое количество видов ЦБ в почвах.

*Работа выполнена в рамках государственного задания ИБ ФИЦ Коми НЦ УрО РАН по теме «Структура и состояние компонентов техногенных экосистем подзоны южной тайги», номер государственной регистрации в ЕГИСУ № 1220401000325.*

## Литература

1. Микроорганизмы как агенты биомониторинга и биоремедиации загрязнённых почв / Под ред. Т.Я. Ашихминой, Л.И. Домрачевой. Киров: Науч. изд-во ВятГУ, 2018. 254 с.
2. Штина Э.А., Андропова М.Ф. Роль почвенных водорослей в восстановлении нарушенных экосистем тундры // *Материалы Всесоюз. совещ. «Охрана растительного мира в Северных регионах»*. Т. 2. Устойчивость растительности к антропогенным факторам и биорекультивация в условиях Севера. Сыктывкар, 1984. С. 67–70.
3. Зимонина Н.М. Почвенные водоросли нефтезагрязнённых земель. Киров: ВГПУ, 1998. 170 с.
4. Фазлутдинова А.И., Суханова Н.В., Сафиуллина Л.М. Сравнительный анализ видового состава почвенных диатомовых водорослей разновозрастных отвалов Учалинского горно-обогатительного комбината (Республика Башкортостан) // *Водоросли: проблемы таксономии, экологии и использование в мониторинге: Материалы докладов 4 Всероссийской научной конференции с международным участием*. СПб.: Реноме, 2018. 512 с.
5. Тарчевский В.В., Штина Э.А. Развитие водорослей на промышленных отвалах // *Современное состояние и перспективы изучения почвенных водорослей в СССР*. Киров: Издательство Кировского сельскохозяйственного института, 1967. С. 146–150.

6. Штина Э.А., Неганова Л.Б., Третьякова А.Н. Роль азотфиксирующих водорослей в зарастании промышленных отвалов. Новосибирск: Наука, 1970. С. 117–123.

7. Штина Э.А., Голлербах М.М. Экология почвенных водорослей. М.: Наука, 1976. 143 с.

8. Костиков И.Ю., Романенко П.О., Демченко Е.М., Даринко Т.М., Михайлюк Т.І., Рибчинський О.В., Солоненко А.М. Водорості ґрунтів України (історія та методи дослідження, система, конспект флори). Київ: Фітосоціоцентр, 2001. 300 с.

9. Шмидт В.М. Математические методы в ботанике Л.: Изд-во ЛГУ, 1989. 287 с.

10. Кондакова Л.В., Дабах Е.В. Мониторинг альго-цианобактериальных сообществ на техногенной территории // Теоретическая и прикладная экология. 2022. № 1. С. 84–90.

11. Кондакова Л.В., Дабах Е.В. Особенности формирования альгоцианофлоры на техногенной территории // Биодиагностика состояния природных и природно-техногенных систем. Материалы XX Всероссийской научно-практической конференции с международным участием. Киров: Вятский государственный университет, 2022. С. 207–213.

12. Дабах Е.В. Формирование почв на техногенных отходах после рекультивации // Биохимические инновации в условиях коррекции техногенеза биосферы. Труды Междунар. биогеохимического симпозиума, посвященного 125-летию со дня рождения академика А.П. Виноградова и 90-летию Приднестровского ун-та. Тирасполь: Приднестровский государственный университет им. Т.Г. Шевченко, 2020. Т. 2. С. 71–75.

13. Штина Э.А., Зенова Г.М., Манучарова Н.А. Альгологический мониторинг почв // Почвоведение. 1998. № 12. С. 1449–1461.

14. Кабиров Р.Р., Гайсина Л.А., Сафиуллина Л.М., Бакиева Г.З., Сафиуллин С.Ю. Модели трансформации сообществ почвенных водорослей в условиях антропогенного загрязнения // Водоросли и цианобактерии в природных и сельскохозяйственных экосистемах: Материалы Международной научно-практической конференции, посвященной 100-летию со дня рождения профессора Эмилии Адриановны Штиной. Киров: Вятская ВГСХА, 2010. С. 140–145.

15. Новичкова-Иванова Л.Н. Почвенные водоросли степей Монголии. Ботанико-географический анализ флор // Общество. Среда. Развитие. 2017. № 4. С. 157–163.

16. Домрачева Л.И. «Цветение» почвы и закономерности его развития. Сыктывкар: Коми НЦ УрО РАН, 2005. 336 с.

## References

1. Microorganisms as agents of biomonitoring and bioremediation in polluted soil / Eds. T.Ya. Ashikhmina, L.I. Domracheva. Kirov: Nauch. izd-vo VyatSU, 2018. 254 p. (in Russian).

2. Shtina E.A., Andronova M.F. The role of soil algae in remediation of damaged tundra ecosystems // Materialy Vsesoyuz. soveshch. "Protection of Flora in the North regions". V. 2. Vegetative resistance to anthropogenic factors and bioreclamation in the conditions of the North. Syktyvkar, 1984. P. 67–70 (in Russian).

3. Zimonina N.M. Soil algae of oil-contaminated soils. Kirov: VGPU, 1998. 170 p. (in Russian).

4. Fazlutdinova A.I., Sukhanova N.V., Safiullina L.M. Comparative analysis of soil Diatom species composition of heterochronous tailings in the Uchalinsk mining and processing integrated plant (the Republic of Bashkortostan) // Algae: taxonomy and ecology issues and their use in monitoring: Materialy dokladov 4 Vserossiyskoy nauchnoy konferentsii s mezhdunarodnym uchastiyem. 2018. 512 p. (in Russian).

5. Tarchevskiy V.V., Shtina E.A. Algae growth on industrial waste discharges // The contemporary state and perspectives of researching soil algae in the USSR. Kirov: Izd-vo Kirovskogo selskokhozyaystvennogo instituta, 1967. P. 146–150 (in Russian).

6. Shtina E.A., Neganova L.B., Tretyakova A.N. The role of nitrogen-fixing algae in overgrowing of industrial waste discharges. Novosibirsk: Nauka, 1970. P. 117–123 (in Russian).

7. Shtina E.A., Gollerbach M.M. Ecology of soil algae. Moskva: Nauka, 1976. 143 p. (in Russian).

8. Kostikov I.Yu., Romanenko P.O., Demchenko E.M., Darienko T.M., Mikhailyuk T.I., Ribchinsky O.V., Solonenko A.M. Algae of the lands of the Ukraine (the history and methods of research, system, flora). Kiev: Fitosotsiotsentr, 2001. 300 p. (in Ukrainian).

9. Shmidt V.M. Mathematic methods in botany. Leningrad: Izd-vo LGU, 1989. 287 p. (in Russian).

10. Kondakova L.V., Dabakh E.V. Monitoring of alga-cyanobacterial communities on technogenic territories // Theoretical and Applied Ecology. 2022. No. 1. P. 84–90 (in Russian). doi: 10.25750/1995-4301-2022-1-084-090

11. Kondakova L.V., Dabakh E.V. The peculiar ways of alga-cyanoflora formation on the technogenic territory // Biodiagnostics of the state of natural and natural-technogenic systems. Materialy XX Vserossiyskoy nauchno-parkτικής konferentsii s mezhdunarodnym uchastiyem. 2022. P. 207–213 (in Russian).

12. Dabakh E.V. Soil formation on technogenic wastes after reclamation // Biochemical innovations in conditions of correcting biosphere technogenesis. Trudy Mezhdunar. Biogeokhimeskogo Simpoziuma, posvyashchennogo 125-letiyu so dnya rozhdeniya akademika A.P. Vinogradova i 90-letiyu Pridnestrovskogo un-ta. 2020. V. 2. P. 71–75 (in Russian).

13. Shtina E.A., Zenova G.M., Manucharova N.A. Algalogical soil monitoring // Pochvovedeniye. 1998. No. 12. P. 1449–1461 (in Russian).

14. Kabirov R.R., Gaisina L.A., Safiullina L.M., Bakiyeva G.Z., Safiullin S.Yu. Models of transformation of soil algae communities in conditions of anthropogenic contamination // Algae and cyanobacteria in natural and agricultural ecosystems: Materialy Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii, posvyashchennoy 100-letiyu so dnya rozhdeniya professora E.A. Shtinoy. 2010. P. 140–145 (in Russian).

15. Novichkova-Ivanova L.N. Soil algae of forest-steppes of Mongolia. Botanic-geographical analysis of flora // Obshchestvo. Sreda. Razvitiye. 2017. No. 4. P. 157–163 (in Russian).

16. Domracheva L.I. Soil "blooming" and the laws of its development. Syktykar: Komi NTs UrO RAN, 2005. 336 p. (in Russian).

**Влияние сплошнолесосечных рубок на биоразнообразии  
среднетаёжных ельников черничных Северо-Востока  
европейской части России**

© 2023. И. А. Лиханова<sup>1</sup>, к. б. н., н. с., Э. А. Генрих<sup>2</sup>, аспирант,  
Е. М. Перминова<sup>1</sup>, м. н. с., Г. В. Железнова<sup>1</sup>, д. б. н., в. н. с.,  
Ю. В. Холопов<sup>1</sup>, к. б. н., н. с., Е. М. Лаптева<sup>1</sup>, к. б. н., зав. отделом,

<sup>1</sup>Институт биологии Коми научного центра  
Уральского отделения Российской академии наук,  
167982, Россия, г. Сыктывкар, ул. Коммунистическая, д. 28,

<sup>2</sup>Северный (Арктический) федеральный университет  
имени М. В. Ломоносова,  
163002, Россия, г. Архангельск, набережная Северной Двины, д. 17,  
e-mail: likhanova@ib.komisc.ru

В статье рассмотрена динамика биоразнообразия компонентов производных послерубочных растительных сообществ в ряду восстановления ельников черничных в биоклиматических условиях средней тайги. На каждой сукцессионной стадии (1(2)-летние, 17(18)-летние, 49(50)-летние производные послерубочные сообщества и коренной лес) проведено в среднем по 20 описаний (всего 81). На основе полученного материала определены видовое богатство и индексы биоразнообразия отдельно для древесного, кустарникового, травяно-кустарничкового и мохового ярусов. Выявлено, что промышленные рубки леса крайне негативно влияют на видовое богатство лесных видов. Это выражается в их потере (особенно стенобионтов), уменьшении обилия и константности. В производных сообществах на территории пасек и пасечных волоков отмечено снижение биоразнообразия в древесном, кустарниковом и моховом ярусах, при возрастании – в травяно-кустарничковом за счёт внедрения луговых, опушечных, болотных видов на фоне уменьшения обилия доминантов лесных экосистем. В производных сообществах на сильнонарушенных участках лесосеки (волоки магистральные) происходит возрастание как общего видового богатства, так и биоразнообразия во всех ярусах, кроме древесного. Фиксируемое возрастание показателей происходит благодаря формированию сообществ из наиболее активных видов разных эколого-ценотических групп.

**Ключевые слова:** Европейский Северо-Восток России, зимние сплошнолесосечные рубки, ельники черничные, биоразнообразии, средняя тайга.

**The effects of clear cutting on the biodiversity  
of middle taiga blueberry spruce forests in the North-East  
of European Russia**

© 2023. I. A. Likhanova<sup>1</sup> ORCID: 0000-0001-8781-4768, E. A. Genrikh<sup>2</sup> ORCID: 0000-0001-9085-4365,  
E. M. Perminova<sup>1</sup> ORCID: 0000-0002-8650-2524, G. V. Zheleznova<sup>1</sup> ORCID: 0000-0002-8208-0838,  
Yu. V. Kholopov<sup>1</sup> ORCID: 0000-0002-5725-746X, E. M. Lapteva<sup>1</sup> ORCID: 0000-0002-9396-7979

<sup>1</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>2</sup>Lomonosov Northern (Arctic) Federal University,  
17, Severnaya Dvina Emb., Arkhangelsk, Russia, 163002,

e-mail: likhanova@ib.komisc.ru

The article discusses the biodiversity dynamics of the components of secondary plant communities grown after winter clear cutting in the series of restoration of blueberry spruce forests in the bioclimatic conditions of the middle taiga subzone. For every succession stage (1(2)-year-old, 17(18)-year-old and 49(50)-year-old secondary communities and primary forest), about 20 descriptions (81 in total) were done. The authors separately describe the plant communities of forests swaths, skidding trails in cutting strip and main skid roads. On the basis of the obtained results, we

determined species richness and biodiversity indices separately for tree, shrub, herb-dwarf shrubby, and moss layers. Industrial logging has been found to have an extremely negative impact on the species richness of forest species which absolutely disappear (especially stenobionts), decrease in abundance and constancy. In secondary communities on the territory of forest swaths and skidding trails, we fixed a decrease in biodiversity in the tree, shrub and moss layers and an increase in the herb-dwarf shrubby layer due to invasion of meadow, edge, and peatland species against a decrease in the abundance of species normally dominating in forest ecosystems. At heavily disturbed areas of the cutting area (main trails), secondary communities increase in both the total species richness and biodiversity at any layer except for the woody layer. The recorded increase in values happens due to formation of communities of very active species from different ecologic and cenotic groups. The floristic composition of the disturbed forest phytocenosis does not recover in fifty years after the anthropogenic impact.

**Keywords:** biodiversity, succession, clearcutting, middle taiga, European North-East of Russia.

В настоящее время в результате интенсивного природопользования и возрастания угрозы экологических кризисов вопрос сохранения биоразнообразия лесов крайне актуален [1–4]. Сохранение биологического разнообразия – один из важных принципов устойчивого лесопользования. Необходимость учёта и сохранения биоразнообразия продиктована требованиями законодательства Российской Федерации (РФ), международных конвенций и договоров, ратифицированных РФ [2, 5].

Ельники зеленомошные на Европейском Северо-Востоке России являются зональным типом еловых лесов, развивающимся на плакорах и наиболее приспособленным к климатическим и эдафическим условиям таёжной зоны [6]. Наиболее значительное негативное воздействие на их сообщества оказывают промышленные рубки. Лесозаготовительная деятельность ведёт к разрушению структуры и состава лесов и изменению их биоразнообразия. Однако характер изменений биоразнообразия в ходе послерубочных сукцессий изучен недостаточно [7]. Ранее нами были выполнены исследования производных сообществ, сформировавшихся после проведения зимних сплошнолесосечных рубок в подзоне средней тайги Республики Коми. Дана характеристика их видового богатства и выполнена их классификация. Полученные результаты опубликованы в работе [8].

Цель данной работы – выявить закономерности динамики биоразнообразия растительных сообществ, сформировавшихся после проведения зимних сплошнолесосечных рубок среднетаёжных ельников мелкотравно-чернично-зеленомошных с учётом степени нарушенности территории вырубки.

### Объекты и методы исследования

Материал собран на территории Республики Коми (Усть-Куломский р-н, подзона средней тайги). В растительном покрове преобладают еловые, елово-пихтовые, а местами –

и пихтовые леса, почти исключительно зеленомошные. Регион характеризуется умеренно холодным климатом со среднегодовой температурой воздуха 0,3 °С. Средняя температура самого тёплого месяца (июль) – 17,3 °С, самого холодного (январь) – -16,5 °С. Годовое количество осадков в среднем составляет 500–520 мм.

Объектами исследования послужили сообщества: (I) коренного ельника мелкотравно-чернично-зеленомошного в пределах нетронутого антропогенной деятельностью лесного массива площадью 170 га (координаты 61,76333° с. ш., 54,29639° в. д.); (II) разновозрастные производные сообщества – 1(2)-летние (пробная площадь 1), 17(18)-летние (пробная площадь 2), 49(50)-летние (пробная площадь 3). Производные сообщества сформировались после зимних сплошнолесосечных рубок, осуществлённых в разные годы в том же типе леса в схожих лесорастительных условиях на суглинистых подзолистых текстурно-дифференцированных почвах. Координаты, площадь и время проведения рубок: 1 – 61,98333° с. ш., 54,05472° в. д.; 30 га; в 2001–2002 гг.; 2 – 61,80389° с. ш., 54,26389° в. д.; 30 га; в 2017–2018 гг.; 3 – 61,8075° с. ш., 54,07694° в. д.; 10 га; в 1969–1970 гг.

Рубки проводили либо по скандинавской технологии с использованием комплекса машин Харвестер и Форвардер (2001–2002 и 2017–2018 гг.), либо по традиционной хлыстовой технологии с сохранением елово-пихтового подроста с помощью трактора ТДТ-40 (1969–1970 гг.). Площадь пасек составляла 70–80%, пасечных волоков – 20–30%, магистрального волока – до 10% от площади лесосеки.

Проведение рубок в зимний период, по сравнению с летним, обуславливает незначительное нарушение травяно-кустарничкового и мохово-лишайникового ярусов на пасечных участках. Пасечные волоки, как правило, захламлиены порубочными остатками, которые покрывают в среднем 34% поверхности.

В пределах магистральных волоков растительный покров и верхние горизонты почвы практически полностью уничтожены под действием лесозаготовительной техники.

В период с 2019 по 2020 гг. выполнены геоботанические описания растительности в пределах выделенных пробных площадей (площадь площадок описания – 100 м<sup>2</sup>). Проведён сплошной перебор деревьев и подростов, определены их диаметр и высота. Состав древостоя рассчитан по вкладу отдельных видов древесных растений в общие запасы древесины. Выявлен видовой состав и проективное покрытие сосудистых растений и мхов.

В совокупности проанализировано 81 геоботаническое описание. Ординация сообществ выполнена с помощью метода неметрического многомерного шкалирования — NMS. В качестве меры различия применён коэффициент Жаккара. Кривые накопления видов построены методом «разрежения» [9]. Мерой альфа-разнообразия служили индексы: 1) Симпсона ( $D$ ) в форме  $1 - D$ ; 2) Шеннона ( $H$ ); 3) Менхиника ( $D_{Mn}$ ); 4) Маргалефа ( $D_{Mg}$ ), рассчитанные по формулам:

$$D = \sum \frac{n_i \cdot (n_i - 1)}{N \cdot (N - 1)}, \quad (1)$$

$$H = -\sum \frac{n_i}{N} \ln \frac{n_i}{N}, \quad (2)$$

$$D_{Mn} = \frac{S}{\sqrt{N}}, \quad (3)$$

$$D_{Mg} = \frac{S - 1}{\ln N}, \quad (4)$$

где  $n_i$  – проективное покрытие  $i$ -го вида,  $N$  – сумма проективных покрытий,  $S$  – количество выявленных видов.

Индексы разнообразия высчитывали отдельно для древесного, кустарникового, травяно-кустарничкового/травяного и мхового ярусов, как рекомендовано в работе [10]. Построение кривых накопления видов и расчёты индексов произведены в программе Past 4.10 [11].

### Результаты и обсуждение

**Коренные сообщества.** Древостои коренных сообществ – смешанные по составу (табл. 1), разновозрастные (60–230). В подросте преобладает *Picea obovata*. Подлесок редкий, в основном из *Sorbus aucuparia*. В травяно-кустарничковом ярусе доминирует *Vaccinium myrtillus*, обилён *Gymnocarpium dryopteris*, постоянны *Dryopteris austriaca*, *Equisetum sylvaticum*, *Linnaea borealis*, *Luzula*

*pilosa*, *Lycopodium annotinum*, *Maianthemum bifolium*, *Oxalis acetosella*, *Trientalis europaea*. Моховой ярус образован *Hylocomium splendens* и *Pleurozium shreberi*. Достаточно много крупномерного сухостоя и валежа всех стадий разложения, имеются вывалы.

**Производные сообщества пасек и пасечных волоков.** Рубка приводит к сильным изменениям условий экотопа даже на территориях со слабонарушенным напочвенным покровом (пасеки, волоки пасечные). Удаление древостоя, влекущее снижение суммарного испарения, уменьшение транспирации и испарения задержанных осадков, обуславливает увеличение влажности суглинистой почвы. Временное поверхностное переувлажнение почв на территории пасек и пасечных волоков «молодых» вырубок (период послерубочной сукцессии 1(2)–17(18) лет) индицируется внедрением и увеличением обилия влаголюбивых видов сосудистых растений (*Calamagrostis purpurea*, *Carex globularis*) и мхов (*Aulacomnium palustre*, *Polytrichum commune*, *Sphagnum angustifolium*). Сильное осветление нижних ярусов по сравнению с коренным ельником ведёт к сильному обеднению видового состава за счёт потери ряда лесных видов (рис. 1, 2). Практически полностью исчезают *Barbilophozia lycopodioides*, *B. hatcheri*, *Dryopteris austriaca*, *Goodyera repens*, *Hylocomiastrum umbratum*, *Phegopteris connectilis* и др. Значительное число лесных видов снижает постоянство и/или обилие: *Gymnocarpium dryopteris*, *Hylocomium splendens*, *Maianthemum bifolium*, *Melampyrum pratense*, *Oxalis acetosella*, *Pleurozium schreberi*, *Trientalis europaea*, *Vaccinium myrtillus*. Хотя в ходе сукцессии идёт внедрение не только влаголюбивых, но и светолучивых трав (*Aulacomnium palustre*, *Avenella flexuosa*, *Calamagrostis purpurea*, *Carex globularis*, *Chamaenerion angustifolium*, *Equisetum sylvaticum*, *Polytrichum commune*, *Rubus arcticus*), оно не может компенсировать эту потерю, в связи с чем видовое разнообразие производных сообществ пасек (ПС<sub>П</sub>) и производных сообществ пасечных волоков (ПС<sub>ВП</sub>) ниже, чем в коренных сообществах (рис. 1). Восстановление древостоя в ходе сукцессии способствует разблачиванию территорий вырубок и, следовательно, исчезновению или уменьшению обилия влаголюбивых видов; восстановлению светового режима и соответственно уменьшению числа луговых и опушечных видов. Структура 49(50)-летних послерубочных сообществ приближается



Таблица 1 / Table 1

Некоторые характеристики растительных сообществ в ходе послерубочной сукцессии  
Some characteristics of plant communities during post-cutting succession

Сообщества Communities	KE PSF	PC <sub>П</sub> / SC <sub>S</sub>			PC <sub>ВП</sub> / SC <sub>СТ</sub>			PC <sub>ВМ</sub> / SC <sub>МТ</sub>		
Длительность послерубочной сукцессии, лет Succession period, years	–	1 (2)	17 (18)	49 (50)	1 (2)	17 (18)	49 (50)	1 (2)	17 (18)	49 (50)
Древостой / Tree stand состав / composition	5Е4П1Б	7Е2П1Б	4Е3Б3П	5Е3Б2П	6Е3П1Б	8Е2Е+П	8Е2Е+П	–	9Б1Ос+Е+С	10Б+П+Е+Ос
сомкнутость крон crown density	0,5	< 0,1	0,5	0,6	< 0,1	0,2	0,6	–	0,7	0,6
количество, тыс. шт./га number, thous. inds./ha	0,7	2,5	7,1	3,2	0,2	4,7	2,2	–	21,0	2,6
высота, м / height, m	18,3	1,5	5	14	3	4	19	–	4,4	17,6
диаметр, см diameter, cm	22,7	–	6	15	3	5	15	–	2,9	13,2
Кустарниковый ярус / Shrub layer										
сомкнутость крон crown density	0,1	0,1	0,2	0,2	0,1	0,2	0,2	–	0,2	0,2
высота, м / height, m	4,0	2,7	2	4	1,5	2	4	–	2,9	5,6
Покровные ярусы, % / Vegetation cover, %										
травяно-кустарничковый herb-dwarf shrubby layer	50	30	20	40	20	20	40	55	30	50
мохово-лишайниковый moss-lichen layer	60	70	90	55	30	75	25	20	25	10
Число видов (на 100 м <sup>2</sup> ) / Species number (for 100 m <sup>2</sup> )										
сосудистых растений vascular plants	19	16	18	16	16	17	17	16	27	27
мхов / mosses	14	7	9	9	9	10	9	11	12	8
итого / total	33	23	27	25	25	27	26	27	40	35
Число описаний Number of descriptions	12	7	6	5	9	5	5	12	10	10
Всего видов во всех описаниях Total number of species in all descriptions	67	41	48	43	48	46	42	62	86	70

Примечание: в таблицах, рисунках и далее по тексту KE – сообщества коренного ельника; PC<sub>П</sub> – производные сообщества пазух; PC<sub>ВП</sub> – производные сообщества волоков пазух; PC<sub>ВМ</sub> – производные сообщества волоков магистральных. Прочерк обозначает отсутствие яруса.

Note: in tables, figures and further in the text PSF – communities of primary spruce forest; SC<sub>S</sub> – secondary communities of swaths; SC<sub>СТ</sub> – secondary communities at skidding trail; SC<sub>МТ</sub> – secondary communities of main trails. A dash means no plant layer.

к ненарушенным сообществам, однако внедрения стенобионтных лесных видов не отмечено, видовое разнообразие не достигает уровня, характерного для коренных ельников (рис. 1).

**Производные сообщества магистральных волоков.** На территориях сильно нару-

шенных магистральных волоков протекает квазипервичная сукцессия, характеризующаяся закономерной сменой травяной стадии через древесно-кустарниковую к древесной. Травостой 1(2)-летних PC<sub>ВМ</sub> формируют растения-индикаторы повышенного увлажнения (*Calamagrostis purpurea*, *Carex*

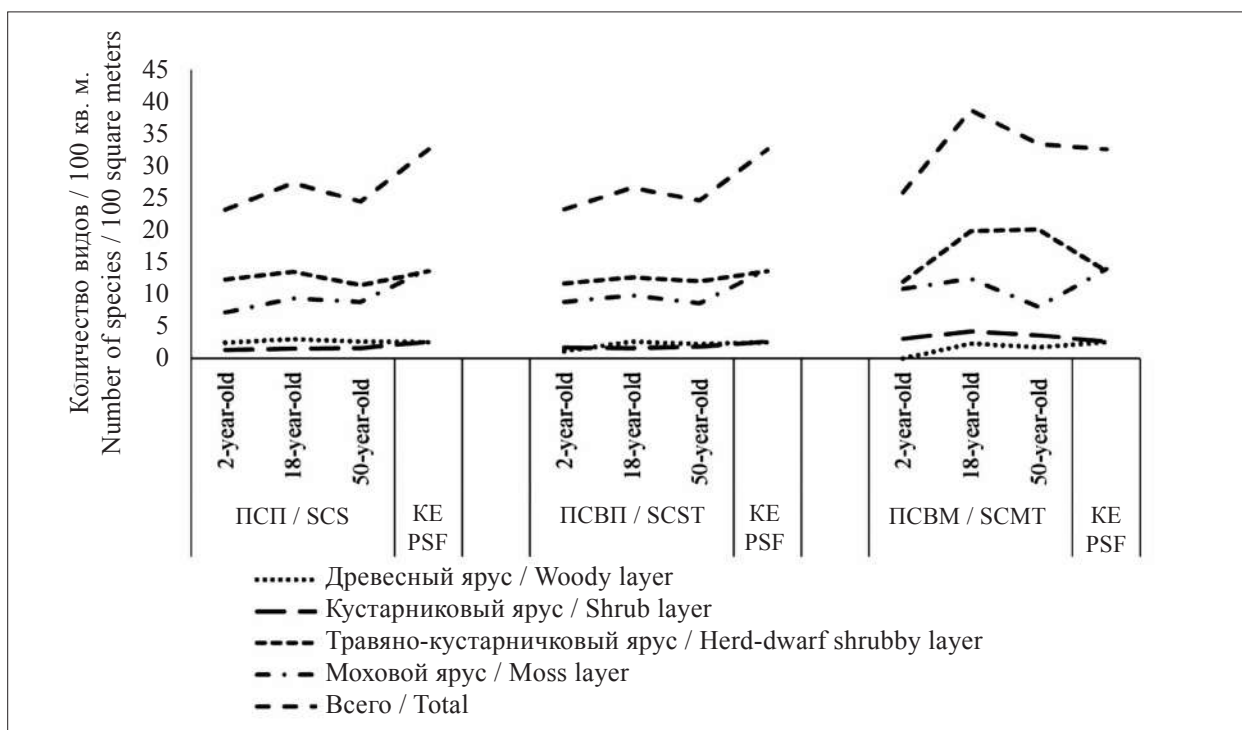


Рис. 1. Динамика видового богатства растительных сообществ в ходе послерубочной сукцессии  
 Fig. 1. The species richness dynamics of plant communities after clear cutting

*brunnescens*, *C. canescens*, *C. globularis*). Отмечены луговые и опушечные виды – *Agrostis gigantea*, *Chamaenerion angustifolium*, *Poa pratensis*. Моховой покров состоит из пионерных, влаголюбивых и светолюбивых видов – *Aulacomnium palustre*, *Bryum* sp., *Ceratodon purpureus*, *Dicranella cerviculata*, *Pohlia* sp., *Polytrichum commune*, *Sphagnum angustifolium*, *S. russowii*. Лесные кустарнички, травы и мхи сохраняются на остатках подстилки. Начинается внедрение раннесукцессионных деревьев (*Betula pubescens*) и кустарников (*Salix caprea*, *S. myrsinifolia*, *S. phylicifolia*), формирующих древесный и кустарниковый ярусы в 17(18)-летних ПС<sub>ВМ</sub>. В последних в травяно-кустарничковом ярусе характерны растения-индикаторы избыточного увлажнения почв (*Calamagrostis purpurea*, *Carex canescens*, *Epilobium palustre*, *Juncus filiformis*) и виды, обычные для нарушенных местообитаний (*Chamaenerion angustifolium*, *Deschampsia cespitosa*). Моховой покров формируют пионерные (*Ceratodon purpureus*), болотные (*Sphagnum angustifolium*, *S. girgensohnii*, *S. russowii*) и лесные мхи (*Hylocomium splendens*, *Pleurozium schreberi*, *Polytrichum commune*). В 17(18)-летних ПС<sub>ВМ</sub> отмечено максимальное число видов (рис. 1). Это происходит за счёт некоторого «экотонного» эффекта между стадиями, когда максимальное накопление видов

эксплерентов первых стадий (луговых, болотных, опушечных) сопровождается началом восстановления разнообразия лесных видов. В 49(50)-летних ПС<sub>ВМ</sub>, когда древесный ярус смыкается, видовое разнообразие снижается (за счёт потери светолюбивых и влаголюбивых видов), но остаётся по-прежнему выше, чем в коренных сообществах (рис. 1).

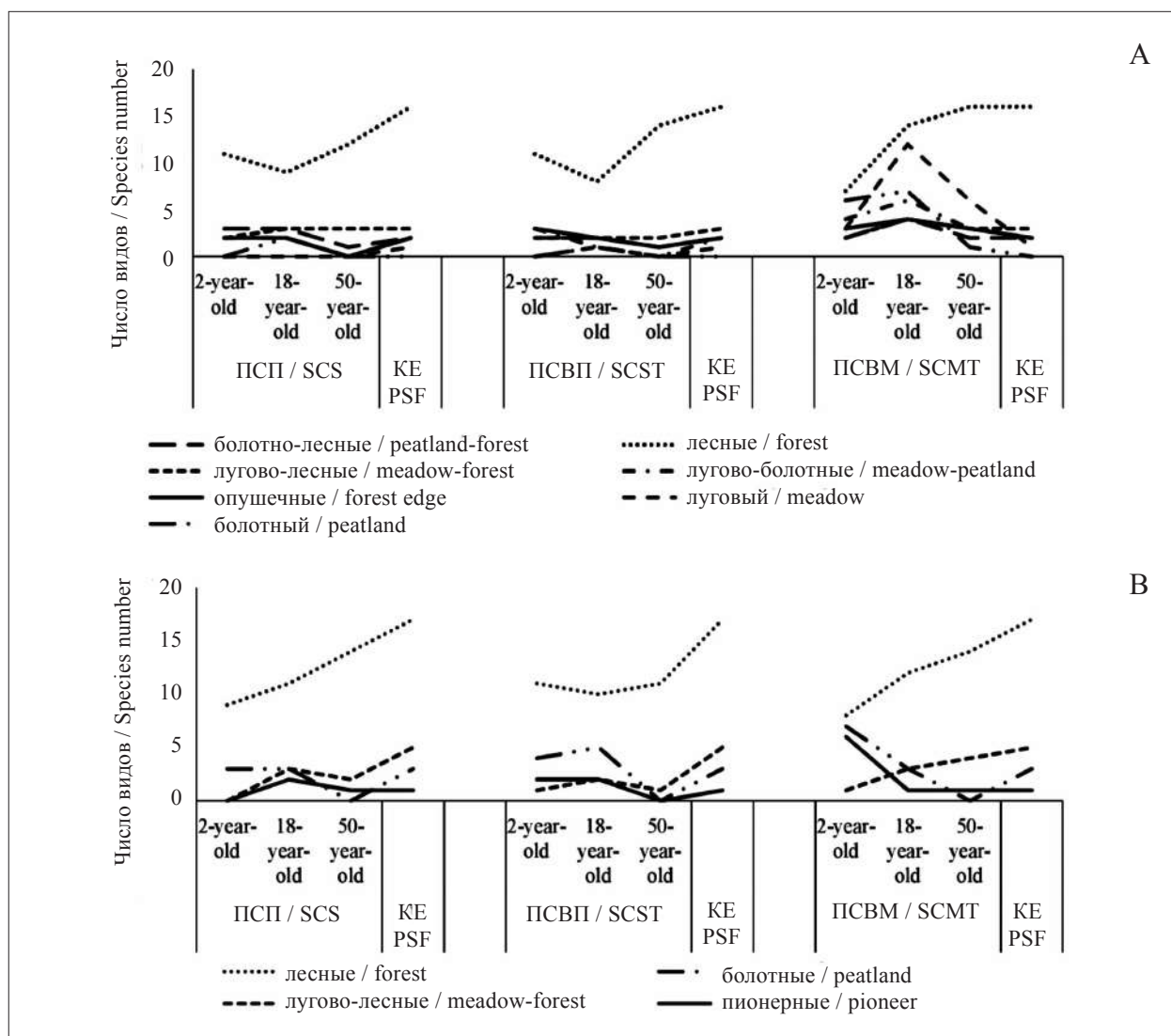
Таким образом, рубка леса негативно сказывается на видовом разнообразии ПС<sub>П</sub> и ПС<sub>ВП</sub>, занимающих основную площадь вырубки. Отмечено снижение видового разнообразия за счёт потери ряда лесных видов, которое не компенсируется за счёт внедрения светолюбивых и влаголюбивых видов, что подтверждает данные других исследователей [12]. Противоположная картина в ПС<sub>ВМ</sub> отмечена в связи с формированием сообществ из раннесукцессионных видов в ходе квазипервичной сукцессии с другими закономерностями динамики видового богатства. На первых стадиях послерубочной сукцессии в сообществах всех технологических элементов характерно увеличение видового разнообразия, а при смыкании древостоя – уменьшение, что согласуется с данными других исследователей [13].

**Кривые накопления видов в коренных и производных сообществах.** Описанные закономерности хорошо визуализируют графики накопления видов, построенные методом

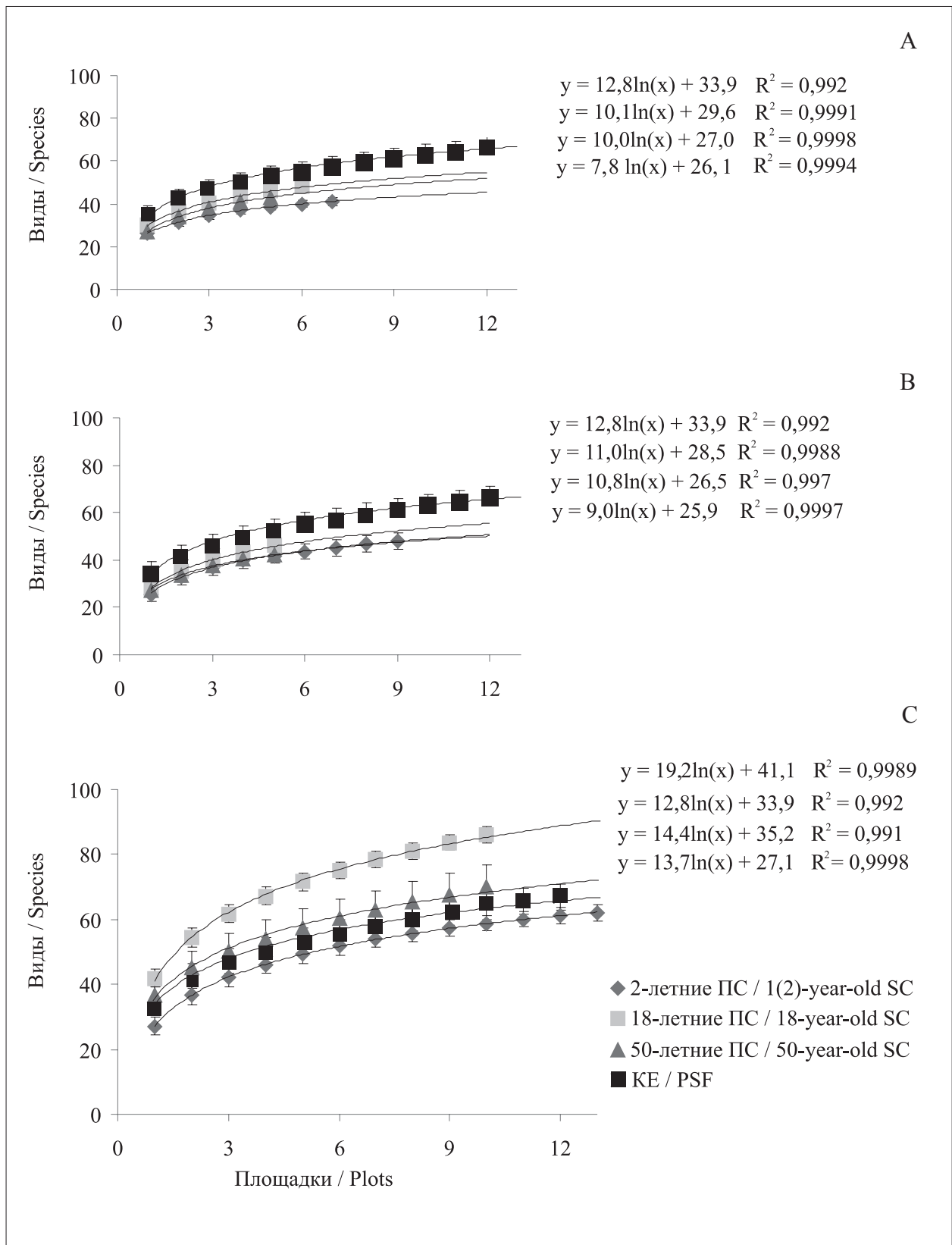
«разрежения» (рис. 3). Если в ПС<sub>П</sub> и ПС<sub>ВП</sub> видовое разнообразие существенно ниже коренных сообществ, то в ПС<sub>ВМ</sub> – выше (исключение травяные фитоценозы первых лет сукцессии).

**Степень различий видового состава коренных и производных сообществ.** Ординация на основе коэффициентов Жаккара показала существенное различие между видовым составом сообществ сильно нарушенных магистральных волоков и слабонарушенных пастек, особенно на первых этапах сукцессии (в 1(2)- и 17(18)-летних производных сообществах); ПС<sub>ВП</sub> занимают, как правило, промежуточное положение между ПС<sub>П</sub> и ПС<sub>ВМ</sub>. В ходе сукцессии разница сглаживается, производные сообщества приближаются по своему видовому строению к коренным сообществам (рис. 4).

**Динамика индексов биоразнообразия основных компонентов растительных сообществ.** В 1(2)-летних ПС<sub>П</sub> и ПС<sub>ВП</sub> отмечено снижение разнообразия в древесном ярусе, которое увеличивается в 17(18)-летних сообществах, а затем в 49(50)-летних – опять снижается из-за высокой плотности сформировавшегося древостоя (табл. 2). Снижение биоразнообразия в кустарниковом и моховом ярусах, по сравнению с коренными сообществами, характерно практически для всех ПС<sub>П</sub> и ПС<sub>ВП</sub> сукцессионного ряда. В травяно-кустарничковом ярусе за счёт внедрения свето- и влаголюбивых трав и снижения обилия доминантных видов коренного ельника биоразнообразия на первых этапах сукцессии увеличивается, но в 49(50)-летних сообществах снижается до значений более низких, чем в коренных сообществах.

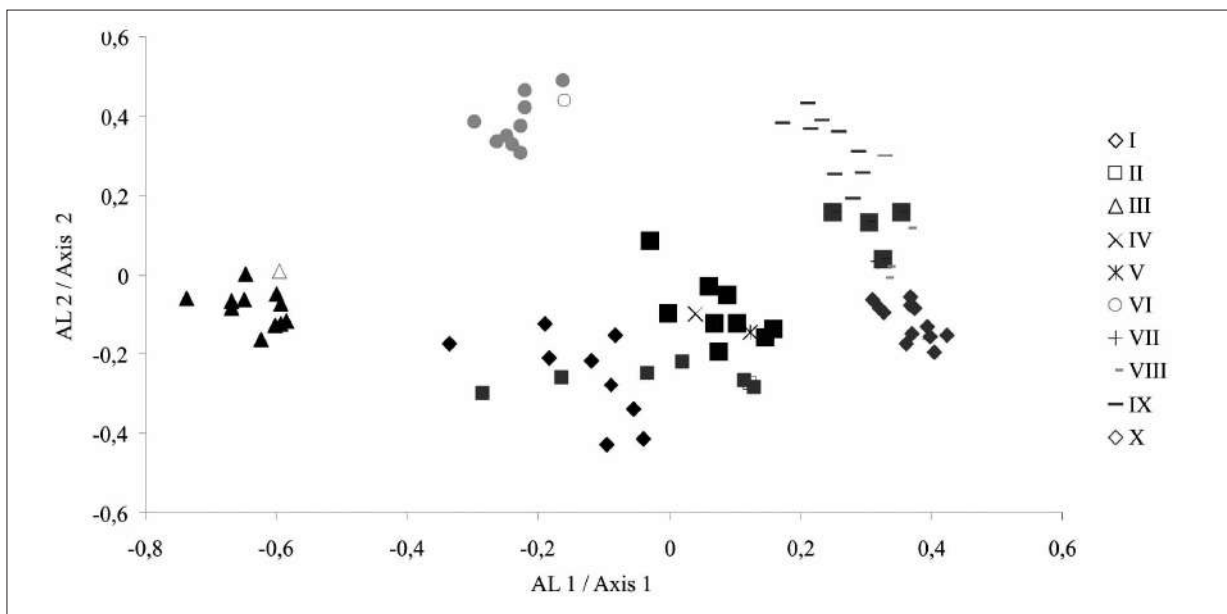


**Рис. 2.** Динамика эколого-ценотических групп травяно-кустарничкового (А) и мохового (В) ярусов растительных сообществ в ходе послерубочной сукцессии  
**Fig. 2.** The dynamics of ecologic-cenotic groups from herb-dwarf shrubby (A) and moss (B) layers of plant communities after clear cutting



**Рис. 3.** Кривые накопления видов: А – в сообществах КЕ и разновозрастных ПС<sub>П</sub>; В – в сообществах КЕ и разновозрастных ПС<sub>ВП</sub>; С – в сообществах КЕ и разновозрастных ПС<sub>ВМ</sub>. Планками погрешностей отмечена стандартная ошибка

**Fig. 3.** Species accumulation curves: А – in communities of PSF and in SC<sub>P</sub>; В – in communities of PSF and in SC<sub>VP</sub>; С – in communities of PSF and in SC<sub>VM</sub>. The error bars dedicate a standard deviation



**Рис. 4.** NMS-ординация сообществ коренного ельника и производных сообществ, приуроченных к разным технологическим элементам вырубки.

I – 1(2)-летние ПС<sub>ВП</sub>, II – 1(2)-летние ПС<sub>П</sub>, III – 1(2)-летние ПС<sub>ВМ</sub>,  
IV – 17(18)-летние ПС<sub>ВП</sub>, V – 17(18)-летние ПС<sub>П</sub>; VI – 17(18)-летние ПС<sub>ВМ</sub>;  
VII – 49(50)-летние ПС<sub>ВП</sub>; VIII – 49(50)-летние ПС<sub>П</sub>; IX – 49(50)-летние ПС<sub>ВМ</sub>; X – коренной лес

**Fig. 4.** NMS ordination of primary spruce forest communities and secondary communities located at different parts of clear-cut. I – 1(2)-year-old SC<sub>ST</sub>, II – 1(2)-year-old SC<sub>S</sub>, III – 1(2)-year-old SC<sub>MT</sub>,  
IV – 17(18)-year-old SC<sub>ST</sub>, V – 17(18)-year-old SC<sub>S</sub>; VI – 17(18)-year-old SC<sub>MT</sub>;  
VII – 49(50)-year-old SC<sub>ST</sub>; VIII – 49(50)-year-old SC<sub>S</sub>; IX – 49(50)-year-old SC<sub>MT</sub>; X – primary forest

В ходе квазипервичных сукцессий в ПС<sub>ВМ</sub> за 50 лет сукцессионных изменений восстановление биоразнообразия древесного яруса не происходит, индексы биоразнообразия имеют более низкие значения по сравнению с коренными сообществами. Биоразнообразие остальных ярусов выше, чем в ненарушенном ельнике, за счёт их большего видового богатства и большей выравненности видов по обилию. Подобная закономерность характерна для первичных сукцессий [14].

Таким образом, на вырубках зафиксировано увеличение индексов разнообразия для травяно-кустарничкового яруса ПС<sub>П</sub> и ПС<sub>ВП</sub>, а в ПС<sub>ВМ</sub> практически для всех ярусов. При этом в производных сообществах целый ряд стенобионтных лесных видов исчезает. В отношении сообществ сукцессионного ряда необходимо чётко понимать динамику биоразнообразия и факторы на неё влияющие. Простая формула «чем больше разнообразие, тем лучше» вряд ли в данном случае может иметь место.

### Заключение

В производных сообществах на территории пасек и пасечных волоков в биоклиматических условиях средней тайги наблюдается законо-

мерное снижение общего видового богатства сообществ и биоразнообразия в древесном, кустарничковом и моховом ярусах и возрастание – в травяно-кустарничковом в результате внедрения луговых, опушечных, болотных видов при уменьшении обилия доминантов лесных экосистем.

Наиболее негативно промышленная рубка леса сказывается на видовом разнообразии лесных видов, что выражается в их потере (особенно стенобионтов), уменьшении обилия и константности. Флористический состав нарушенного лесного фитоценоза не восстанавливается спустя пятьдесят лет после антропогенного воздействия.

На сильнонарушенных участках лесосеки (волоки магистральные) в производных сообществах отмечено как возрастание общего видового богатства, так и биоразнообразия во всех ярусах, кроме древесного. Фиксируемое возрастание показателей происходит благодаря формированию сообществ из наиболее активных видов разных эколого-ценотических групп.

*Работа выполнена в рамках темы НИР отдела почвоведения на 2022–2024 гг. «Криогенез как фактор формирования и эволюции почв арктических и бореальных экосистем европейского Северо-Востока в условиях современных*

Таблица 2 / Table 2

Динамика индексов разнообразия сообществ в ряду послерубочного восстановления ельников черничных  
The dynamics of diversity indexes of plant communities after clear-cutting

Сообщество / Community		KE / PSF		PC <sub>п</sub> / SC <sub>s</sub>		PC <sub>вп</sub> / SC <sub>ст</sub>		PC <sub>вм</sub> / SC <sub>мт</sub>			
		1(2)- year-old	17(18)- year-old	49(50)- year-old	1(2)- year-old	17(18)- year-old	49(50)- year-old	1(2)- year-old	17(18)- year-old	49(50)- year-old	
Показатель / Index		Древесный ярус / Woody layer									
Число видов / Number of species	S	2,5±0,3	2,4±0,5	3,0±0,0	2,6±0,7	1,1±1,1	2,6±0,7	2,2±1,0	–	2,3±0,6	1,7±0,5
Сумма покрытий / Sum paving, %		50,3±4,7	14,1±4,2	45,8±9,7	60,0±8,9	3,9±3,6	21,6±3,3	64,0±11,2	–	68,0±3,1	59,0±6,4
Значения индексов	Симпсона / Simpson	1-D	0,50±0,07	0,48±0,07	0,54±0,14	0,49±0,13	0,28±0,26	0,45±0,27	–	0,13±0,06	0,10±0,07
Indices values	Шеннона / Shannon	H	0,78±0,12	0,77±0,15	0,91±0,19	0,78±0,22	0,42±0,41	0,73±0,40	–	0,38±0,13	0,19±0,13
	Менхиника / Menhinick		0,35	0,68	0,45	0,33	0,38	0,56	–	0,28	0,22
	Маргалефа / Margalef		0,38	0,57	0,53	0,39	0,31	0,52	–	0,31	0,17
Кустарниковый ярус/подлесок / Shrub layer/undergrowth											
Число видов / Number of species	S	2,6±0,4	1,3±0,5	1,5±0,6	1,6±0,7	1,7±0,5	1,6±0,7	1,8±1,0	3,1±0,7	4,2±0,7	3,6±0,8
Сумма покрытий / Sum paving, %		10,0±0,1	9,1±4,5	16,3±7,0	18,8±4,1	7,8±3,3	19,6±2,6	23,0±10,3	3,1±0,7	22,6±4,1	16,4±3,8
Значения индексов	Симпсона / Simpson	1-D	0,55±0,10	0,12±0,17	0,07±0,09	0,15±0,21	0,27±0,19	0,14±0,26	1,00±0,00	0,53±0,05	0,59±0,14
Indices values	Шеннона / Shannon	H	0,88±0,19	0,16±0,22	0,15±0,18	0,25±0,33	0,37±0,28	0,22±0,35	1,35±0,35	1,02±0,14	1,09±0,30
	Менхиника / Menhinick		0,82	0,51	0,39	0,38	0,64	0,36	1,73	0,91	0,91
	Маргалефа / Margalef		0,69	0,12	0,19	0,21	0,29	0,20	1,75	1,05	0,95
Травяно-кустарничковый/травяной ярус / Herb-dwarf shrubby/herbaceous layer											
Число видов / Number of species	S	13,6±0,9	12,3±2,1	13,5±2,4	11,4±2,1	11,7±1,6	12,6±2,6	12,0±2,3	11,9±1,5	19,8±2,0	20,1±2,1
Сумма покрытий / Sum paving, %		53,8±10,3	27,1±9,4	49,8±6,7	40,2±7,3	23,1±9,8	20,4±10,8	39,4±10,8	56,2±9,9	30,8±2,9	52,8±12,1
Значения индексов	Симпсона / Simpson	1-D	0,72±0,08	0,84±0,12	0,92±0,08	0,81±0,14	0,87±0,12	0,93±0,06	0,82±0,15	0,94±0,02	0,80±0,09
Indices values	Шеннона / Shannon	H	1,88±0,25	2,33±0,40	2,69±0,36	2,09±0,50	2,38±0,36	2,62±0,27	2,16±0,46	3,03±0,19	2,44±0,40
	Менхиника / Menhinick		1,92	2,52	3,10	1,81	2,60	2,90	1,93	3,58	2,91
	Маргалефа / Margalef		3,22	3,57	4,26	2,83	3,57	3,96	2,75	5,49	4,95
Моховой ярус / Moss layer											
Число видов / Number of species	S	13,9±1,9	7,1±0,8	9,3±2,8	8,8±0,6	8,8±1,6	9,8±3,7	8,6±1,9	10,8±1,9	12,4±1,6	8,0±1,0
Сумма покрытий / Sum paving, %		61,3±7,0	68,7±9,8	93,3±3,7	54,6±24,1	28,8±12,5	74,0±16,6	23,4±10,6	19,8±3,5	23,9±5,9	13,0±6,9
Значения индексов	Симпсона / Simpson	1-D	0,76±0,06	0,69±0,06	0,65±0,13	0,72±0,18	0,86±0,05	0,67±0,11	0,88±0,07	0,76±0,14	0,93±0,07
Indices values	Шеннона / Shannon	H	1,99±0,25	1,50±0,12	1,47±0,32	1,75±0,46	2,10±0,26	1,61±0,48	2,25±0,28	2,19±0,46	2,27±0,26
	Менхиника / Menhinick		1,79	0,88	0,97	1,25	1,75	1,17	2,45	2,66	2,45
	Маргалефа / Margalef		3,15	1,46	1,84	2,00	2,41	2,07	3,31	3,71	2,99

Примечание: приведены средние значения показателей ± границы доверительного интервала, P = 0,95.  
Note: average values of the indicators ± confidence intervals are given, P = 0,95.

антропогенных воздействий, глобальных и региональных климатических трендов», регистрационный номер: 122040600023-8.

### Литература

1. Butt N., Beyer H.L., Bennett J.R., Biggs D., Maggini R., Mills M., Possingham H.P. Biodiversity risks from fossil fuel extraction // *Science*. 2013. V. 342 (6157). P. 425–426.
2. Усольцев В.А. Биоразнообразие в экосистемах: краткий обзор проблемы // *Эко-потенциал*. 2019. № 1 (25). С. 9–47.
3. Bambalan J.M., Palapal I.K.S., Guleng R.V., Coracero E.E., Gallego R.B.J., Suniega M.J.A. Tree diversity and carbon stock in North Poblacion and South Poblacion (Dipaculao, Aurora, Philippines) // *Theoretical and Applied Ecology*. 2022. No. 2. P. 198–208.
4. Llerena S., Toasa G., Kurbatova A.I. NDVI – alpha diversity relationship in tropical montane cloud forest of Ecuador // *Theoretical and Applied Ecology*. 2022. No. 3. P. 58–67.
5. Laurila-Panta M., Lehikoinen A., Uusitalo L., Venesjärvi R. How to value biodiversity in environmental management? // *Ecological Indicators*. 2015. V. 55. P. 1–11.
6. Мартыненко В.А. Темнохвойные леса // *Леса Республики Коми / Под ред. Г.М. Козубова, А.И. Таскаева. М.: «Дизайн. Информация. Картография», 1999. С. 133–183.*
7. Бурова Н.В., Торбик Д.Н., Феклистов П.А. Изменение флористического разнообразия после выборочных рубок в ельниках черничных // *Лесной вестник*. 2010. № 5. С. 49–52.
8. Лиханова И.А., Перминова Е.М., Шушпанникова Г.С., Железнова Г.В., Пыстина Т.Н., Холопов Ю.В. Динамика растительности после сплошнолесосечных рубок ельников черничных (среднетаёжная подзона европейского северо-востока России) // *Растительность России*. 2021. № 40. С. 108–136.
9. Magurran A. *Ecological diversity and its measurement*. Princeton, New Jersey: Published in Springer Netherlands, 1988. 179 p.
10. Vasilevich V.I. Species diversity of plants // *Contemporary Problems of Ecology*. 2009. V. 2. No. 4. P. 297–303.
11. Hammer Ø., Harper D.A.T., Ryan P.D. Past: Paleontological statistics software package for education and data analysis // *Palaeontologia Electronica*. 2001. V. 4. No. 1. Article No. 4 [Электронный ресурс] [https://palaeo-electronica.org/2001\\_1/past/issue1\\_01.htm](https://palaeo-electronica.org/2001_1/past/issue1_01.htm) (Дата обращения: 27.06.2022).
12. Лиханова Н.В. Изменение биоразнообразия и массы растений напочвенного покрова ельников средней тайги после сплошнолесосечной рубки // *Известия Самарского научного центра Российской академии наук*. 2012. Т. 14. № 1 (5). С. 1309–1312.
13. Ильчуков С.В. Динамика структуры лесного покрова на сплошных вырубках (подзона средней тайги Республики Коми). Екатеринбург: Наука, 2003. 120 с.
14. Whittaker R.H. *Communities and ecosystems*. New York: Macmillan; London: Collier Macmillan, 1975. 385 p.

### References

1. Butt N., Beyer H.L., Bennett J.R., Biggs D., Maggini R., Mills M., Possingham H.P. Biodiversity risks from fossil fuel extraction // *Science*. 2013. V. 342 (6157). P. 425–426. doi: 10.1126/science.1237261
2. Usoltsev V.A. Biodiversity in ecosystems: a brief analysis of the problem // *Eko-potentsial*. 2019. No. 1 (25). P. 9–47 (in Russian).
3. Bambalan J.M., Palapal I.K.S., Guleng R.V., Coracero E.E., Gallego R.B.J., Suniega M.J.A. Tree diversity and carbon stock in North Poblacion and South Poblacion (Dipaculao, Aurora, Philippines) // *Theoretical and Applied Ecology*. 2022. No. 2. P. 198–208. doi: 10.25750/1995-4301-2022-2-198-208
4. Llerena S., Toasa G., Kurbatova A.I. NDVI – alpha diversity relationship in tropical montane cloud forest of Ecuador // *Theoretical and Applied Ecology*. 2022. No. 3. P. 58–67. doi: 10.25750/1995-4301-2022-3-058-067
5. Laurila-Panta M., Lehikoinen A., Uusitalo L., Venesjärvi R. How to value biodiversity in environmental management? // *Ecological Indicators*. 2015. V. 55. P. 1–11. doi: 10.1016/j.ecolind.2015.02.034
6. Martynenko V.A. Dark coniferous forests // *Forests of the Komi Republic. Moskva: “Design. Information Cartography”, 1999. P. 133–183 (in Russian).*
7. Burova N.V., Torbik D.N., Feklistov P.A. Change of a floristic diversity after selective fellings in fir groves bilberry // *Forestry Bulletin*. 2010. No. 5. P. 49–52 (in Russian).
8. Likhonova I.A., Perminova E.M., Shushpannikova G.S., Zheleznova G.V., Pystina T.N., Kholopov Yu.V. Dynamics of vegetation after clearcutting bilberry spruce forests (middle taiga subzone of the european north-east of Russia) // *Rastitelnost Rossii*. 2021. No. 40. P. 108–136 (in Russian). doi: 10.31111/vegrus/2021.40.108
9. Magurran A. *Ecological diversity and its measurement*. Princeton, New Jersey: Published in Springer Netherlands, 1988. 179 p. doi: 10.1007/978-94-015-7358-0
10. Vasilevich V.I. Species diversity of plants // *Contemporary Problems of Ecology*. 2009. V. 2. No. 4. P. 297–303. doi: 10.1134/S1995425509040018
11. Hammer Ø., Harper D.A.T., Ryan P.D. Past: Paleontological statistics software package for education and data analysis // *Palaeontologia Electronica*. 2001. V. 4. No. 1. Article No. 4 [Internet resource] [https://palaeo-electronica.org/2001\\_1/past/issue1\\_01.htm](https://palaeo-electronica.org/2001_1/past/issue1_01.htm) (Accessed: 27.06.2022).
12. Likhonova N. Biodiversity and biomass changes of ground cover plants on clear felling sites of spruce forests in the middle taiga // *Izvestiya Samarskogo nauchnogo tsentra Rossiyskoy akademii nauk*. 2012. V. 14. No. 1 (5) P. 1309–1312 (in Russian).
13. Ilchukov S.V. Dynamics of the structure of forest cover on clear cuts (middle taiga subzone, Komi Republic). Ekaterinburg: Nauka, 2003. 120 p. (in Russian).
14. Whittaker R.H. *Communities and ecosystems*. New York: Macmillan; London: Collier Macmillan, 1975. 385 p.

## Пространственно-временные изменения макрофитобентоса в прибрежных ландшафтах у мыса Коса Северная (Севастополь)

© 2023. Т. В. Панкеева, к. г. н., с. н. с.,  
Н. В. Миронова, к. б. н., с. н. с.,  
Федеральный исследовательский центр «Институт биологии южных морей  
имени А. О. Ковалевского РАН»,  
29900, Россия, г. Севастополь, пр. Нахимова, д. 2,  
e-mail: tatyapankeeva@yandex.ru

Впервые на основе ландшафтного подхода выполнен сравнительный анализ пространственно-временных изменений макрофитобентоса у мыса Коса Северная за период с 1964 по 2020 гг. Составлены ландшафтные карты прибрежной зоны, показано распространение донных природных комплексов с ключевыми черноморскими фитоценозами (*Ericaria crinita*, *Gongolaria barbata* и *Phyllophora crispa*). Установлено, что за более чем 50 лет в акватории у мыса Коса Северная произошла существенная перестройка и деградация растительной компоненты подводных ландшафтов, особенно на нижней границе фитали, что обусловлено воздействием как природных факторов, так и усилением антропогенной деятельности в береговой зоне. Однако высокая степень сохранности коренных фитоценозов, наличие краснокнижных видов (*P. crispa* и *Stilophora tenella*) позволяют рекомендовать этот участок как перспективный для заповедания.

**Ключевые слова:** прибрежная зона, донный природный комплекс, макрофитобентос, памятник природы, Чёрное море.

## Spatio-temporal changes of macrophytobenthos in coastal landscapes at Cape Kosa Severnaya (Sevastopol)

© 2023. T. V. Pankeeva ORCID: 0000-0002-8933-6103  
N. V. Mironova ORCID: 0000-0001-7110-7081  
A. O. Kovalevsky Institute of Biology of the Southern Seas  
of the Russian Academy of Sciences,  
2, Nakhimov Ave., Sevastopol, Russia, 299011,  
e-mail: tatyapankeeva@yandex.ru

Using a landscape approach, the paper presents for the first time the results of a comparative analysis of spatio-temporal changes in the macrophytobenthos, performed at Cape Kosa Severnaya for the period from 1964 to 2020 with landscape maps compiled by the authors. In addition, it describes the distribution of the bottom natural complexes (BNC) with key Black Sea phytocoenoses (*Ericaria crinita*, *Gongolaria barbata* и *Phyllophora crispa*). It was found that during this period a dramatic increase in the biomass of the phytocoenosis was recorded in the BNC block-boulder bench with dominance of *E. crinita*, while the proportion of its edificator remained high. The maximum contribution of epiphytic sinusia to biomass of algocoenosis over the entire study period was recorded in 2006. For the BNC upper shoreface slope consisting of coarse-grained deposits with dominance of *E. crinita* и *G. barbata*, an increase in phytocoenosis biomass was recorded only at the upper boundary during the study period. For the BNC of gently dipping accumulation plain consisting gravel-psammitic sediments with inclusion of shell fragments and dominance of *Phyllophora crispa*, a catastrophic decline in the productivity of the phytocoenosis and its edificator is typical. The total biomass of macrophytes decreased by more than an order of magnitude during the study period. It was found that over a span of 50 years, the plant components of bottom natural complexes at Cape Kosa Severnaya underwent significant restructuring and degradation due to natural factors and anthropogenic activity in the coastal zone. The high degree of preservation of indigenous phytocoenoses, the presence of red book species (*P. crispa* and *Stilophora tenella*) allow us to recommend the site at the Cape Kosa Severnaya as a promising reserve.

**Keywords:** coastal zone, bottom natural complex, macrophytobenthos, nature monument, Black Sea.



Донная растительность является функционально важным звеном биотической компоненты прибрежной экосистемы шельфа, которая выполняет средообразующую роль, участвует в самоочищении и аэрации водных масс, имеет высокий продукционный потенциал. Известно, что макрофитобентос выступает индикатором своеобразия морфологических комплексов горизонтального расчленения ландшафтов [1, 2].

В то же время, макрофиты, активно реагируя на изменения среды, являются одним из уязвимых компонентов прибрежной экосистемы, что позволяет использовать их количественные показатели для изучения состояния ландшафтов [3, 4]. Несмотря на то, что ландшафтный подход получил широкое применение в морских исследованиях, тем не менее, в гидробиологии его используют редко [1, 5]. Этот подход предполагает комплексное изучение природных систем, которое позволяет разработать научные рекомендации по рациональному природопользованию и управлению прибрежными зонами.

В связи с этим цель работы – выявление пространственно-временных изменений макрофитобентоса на основе ландшафтного подхода за период 1964–2020 гг. для обоснования приоритетных акваторий для заповедания.

#### Материалы и методы исследования

Авторами собраны и проанализированы материалы полевых ландшафтных и гидробиологических исследований (летний период 1997, 2006 и 2017–2020 гг.), проведённых в акватории прибрежной зоны у мыса Коса Северная в соответствии с традиционными методиками [5]. В 2017–2020 гг. заложены три ландшафтных и один гидробиологический профили, а в 1997 и 2006 гг. были проведены гидробиологические съёмки (рис. 1, см. цв. вкладку V).

При изучении структуры ландшафтов использовали метод ландшафтного профилирования с детальным описанием ключевых участков. Дайверы-исследователи проходили вдоль профиля, выполняя фото- и видеосъёмки. Отбор проб макрофитобентоса проводили по стандартной фитоценотической методике [6]. Идентифицировали водоросли по определителю [7] с учётом последних номенклатурных изменений. Выделение фитоценозов осуществляли согласно доминантной классификации по [6]. Всего собрано и обработано 64 количественные пробы. Для анализа многолетних изменений состава и структуры

макрофитов за 1964 г. использовали опубликованные материалы, собранные по аналогичной методике [8].

Для создания ландшафтной карты использовали программный пакет QGIS 2.14.18 и электронную основу батиметрической карты. Сопряжённый анализ карт геологического строения, батиметрической карты и сведений полевых съёмок позволили провести экстраполяцию участков акватории со сходными параметрами для выделения границ донных природных комплексов (ДПК), которые представляют относительно однородные участки дна, характеризующиеся единством взаимосвязанных компонентов: литогенной основы, придонной водной массы и населяющих их морских организмов [4].

#### Результаты и обсуждение

В ландшафтной структуре прибрежной зоны у мыса Коса Северная выделены ДПК с участием доминирующих видов макрофитов (*Cystoseira crinita*=*Ericaria crinita* (Duby) Molinari & Guiry, *Cystoseira barbata*=*Gongolaria barbata* (Stackhouse) Kuntze и *Phyllophora crispa* (Huds.) P.S. Dixon): в 2017 г. – 4, 2006 г. – 2, 1997 г. – 3, 1964 г. – 4 (рис. 2, см. цв. вкладку V).

Донный природный комплекс глыбово-валунного бенча с преобладанием *Ericaria crinita* (1) регистрировали на глубине 0,5–1 м в течение всего исследуемого периода (рис. 2, табл. 1). В 2017 г. описан фитоценоз *E. crinita*. Его биомасса и доля эдификатора в изучаемом диапазоне глубин отличаются высокими показателями (табл. 1). Плотность зарослей *E. crinita* настолько велика, что нарушается ярусная структура альгоценоза, и в этом случае, вероятно, не хватает субстрата для произрастания макрофитов 2–3-го ярусов. В предыдущие годы скопления этого вида были более разреженными, что способствовало формированию ярусности сообщества. Ранее был описан фитоценоз *Ericaria crinita*–*Cladostephus spongiosus*–*Gelidium crinale*. Биомасса макрофитов в 2006 г. в 3–5 раз, в 1997 г. в 3–9 раз, в 1964 г. в 4 раза ниже, чем эта величина в 2017 г. (табл. 1). Доля доминанта 1-го яруса на протяжении периода изучения оставалась высокой (табл. 1). Вклад *E. crinita* варьировал от 96 до 32% биомассы макрофитов, при этом максимальное значение отмечено в 2017 г., а минимальное – в 1997 г. В составе сообщества (1964–2017 гг.) отмечены *Gelidium*

Таблица 1 / Table 1

Изменение биомассы макрофитов, доли доминирующих видов и их эপিцитов на различных ДПК у мыса Коса Северная при увеличении глубины по годам  
Change in the projective cover, biomass of macrophytes, proportion of dominant epiphytic species in BNC by Cape Kosa Severnaya with increasing depth

ДПК BNC	Глубина, м Depth, m	Год Year	Биомасса макрофитов, г/м <sup>2</sup> Biomass of macrophytes, g/m <sup>2</sup>	Доля, % / Proportion, %		
				<i>Ericaria rinita</i> , <i>Gongolaria barbata</i>	<i>Phyllophora crispa</i>	эпициты epiphytic
1	0,5–1	1964	3040,0±550,9	93	0	1
		1997	3506,7±572,9–1492,3±451,5	89–32	0	1–3
		2006	3984,2±771,1–2786,2±136,1	86–67	0	12–29
		2017	11457,8±2031,5–12888,7±4380,1	94–96	0	5–4
2	1–5	1964	3109,0±273,9	94	0	2
		1997	1444,0±381,6	58	0	0
	1–10	2006	2247,0±538,4–591,2±151,9	48–38	0	51–57
		2017	5572,2±825,2–3157,1±501,9	78–65	0	16–33
3	5–10	1964	2451,0±236,1–1615,0±163,1	84–42	16–52	0
		1997	1141,6±319,3–571,1±42,5	68–44	13–20	1
4	10–15	2017	130,6±41,2	5	0	15
5	10–15	1964	826,0±51,4	0	75	0
	15–20	2017	74,6±18,6	0	96	3

Примечание: нумерация ДПК соответствует сведениям, представленным на рисунке 2.

Note: the numbering and description of the BNC corresponds to the information presented in Figure 2.

*spinosum* (S.G. Gmrl.) P.C. Silva и *Ulva rigida* C. Ag. Эпифитная синузия, за исключением 2006 г., представлена слабо (табл. 1).

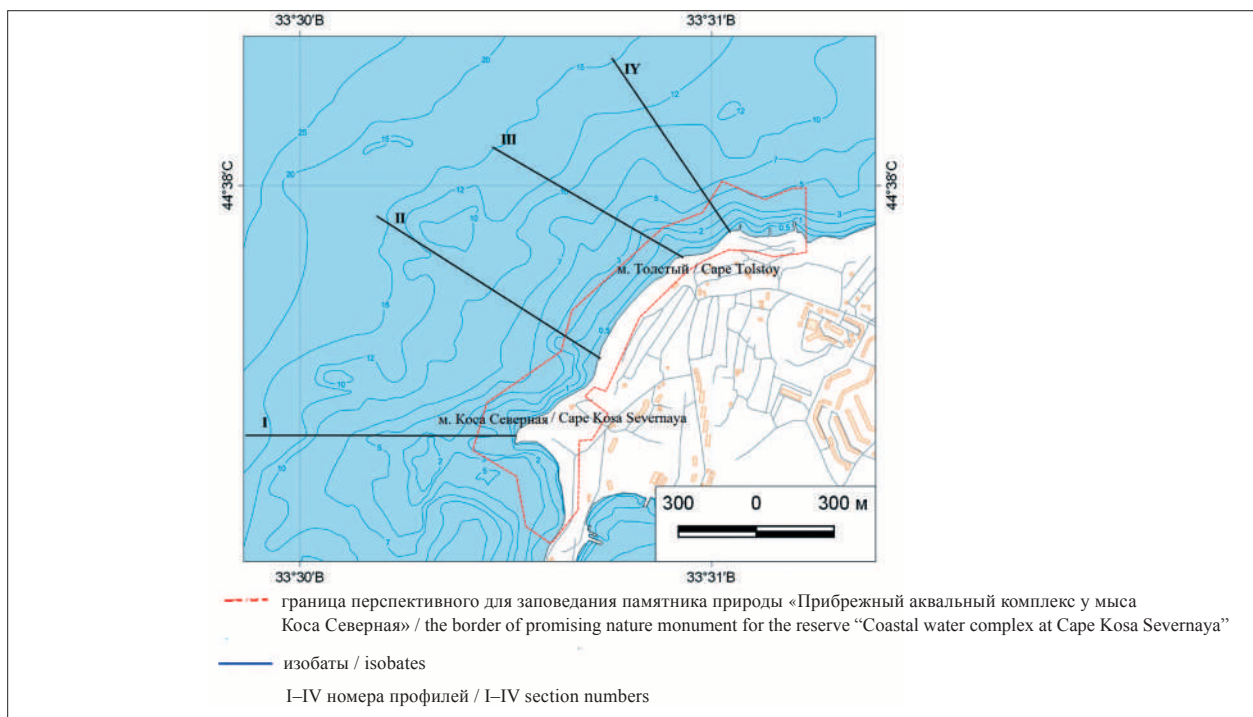
В 2017, 1997 и 1964 гг. на эпифитные водоросли приходилось 1–5% биомассы макрофитов, тогда как в 2006 г. их доля была в 2–7 раз выше, чем в 2017 г. Среди эпифитов преобладала *Vertebrata subulifera* (C. Ag.) Kuntz. (3–17% биомассы макрофитов), встречались *Laurencia coronopus* J. Ag. и виды рода *Ceramium*. Характерно, что в 1964 и 2017 гг. значения индекса Шеннона были низкие, что свидетельствует об однородной структуре фитоценозов с преобладанием вида-доминанта. В 1997 и 2006 гг. видовое разнообразие альгосообщества было выше, что отразилось на величине индекса, значения которого увеличились (табл. 2).

Донный природный комплекс подводного склона, сложенного грубообломочными отложениями, с преобладанием *Ericaria crinita* и *Gongolaria barbata* (2) также регистрировали в течение всего изучаемого периода. Однако глубина его распространения изменялась по годам. Так, если в 1964 и 1997 гг. этот ДПК был описан в интервале глубин 1–5 м, то в 2006 и 2017 гг. он занимал глубины 1–10 м (рис. 2, табл. 1). Описан фитоценоз *Ericaria crinita*+*Gongolaria barbata*–*Cladostephus spongiosus*–*Gelidium crinale*. В 2017 г. его

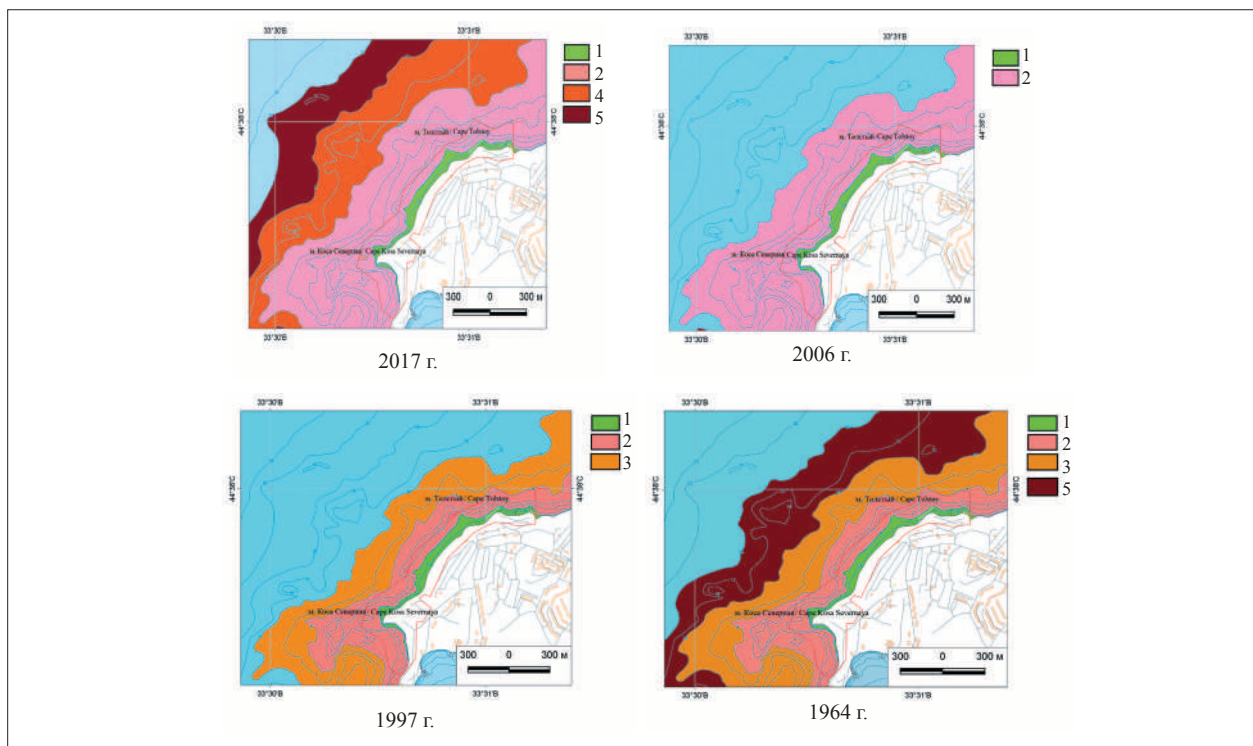
биомасса при увеличении глубины уменьшалась почти вдвое, тогда как в 2006 г. – примерно вчетверо и была в 2,5–5 раз ниже, чем в 2017 г. (табл. 1). Доля эдификаторов 1-го яруса колебалась от 78 (2017 г.) до 38% (2006 г.) биомассы макрофитов. В составе альгоценоза встречались *Ulva rigida*, *Chondria capillaris* (Huds.) M. J. Wynne, а на глубине 5–10 м – глубоководный вид *Carradoriella elongata* (Huds.) Savoie & G.W. Saunders. В 2017 г. отмечена существенная роль эпифитов, при этом в 2006 г. их вклад составлял больше половины биомассы макрофитов (табл. 1). Среди них преобладала *Vertebrata subulifera* (13–30 и 40–54% биомассы макрофитов соответственно), также обнаружены *Stilophora tenella* (Esper) P.C. Silva, *Laurencia coronopus* и *Ectocarpus siliculosus* (Dillwyn) Lyngb. Значения индекса Шеннона свидетельствуют о сложной структуре фитоценоза, где отмечен высокий вклад сопутствующих и эпифитирующих водорослей (табл. 2).

В 1997 г. биомасса фитоценоза невысокая. На его верхней границе она в 4 раза ниже по сравнению с величинами, зафиксированными в 2017 г., а в 1964 г. этот показатель был ниже вдвое (табл. 1). Вклад доминантов 1-го яруса на этом ДПК 20 лет назад не превышал 58%, тогда как в 1964 г. он достигал максимального

**Т. В. Панкеева, Н. В. Миронова «Пространственно-временные изменения макрофитобентоса в прибрежных ландшафтах у мыса Коса Северная (Севастополь)». С. 66.**



**Рис. 1.** Картограмма района исследования (I–IV – номера профилей)  
**Fig. 1.** Schematic map of the region of investigation (I–IV – section numbers)



**Рис. 2.** Картограмма ландшафтной структуры прибрежной зоны у мыса Коса Северная (описание приведено в тексте статьи)  
**Fig. 2.** Schematic map of landscape structure of the coastal zone at Cape Kosa Severnaya (description is given in the text of the article)

значения (94% биомассы макрофитов), зарегистрированного за период наблюдений. В 1964 и 1997 гг. эпифиты практически отсутствовали (табл. 1). Показательно, что в целом в 1997 г. была отмечена полидоминантная структура фитоценоза, а в 1964 г. – олигодоминантная, что отразилось на значениях индекса Шеннона (табл. 2).

**Донный природный комплекс подводного склона, сложенного грубообломочными отложениями, с доминированием *Gongolaria barbata* и с чередованием галечно-гравийных с битой ракушей донных осадков, где преобладала *Phyllophora crispa* (3), был распространён на глубине 5–10 м только в 1964 и 1997 гг. (рис. 2, табл. 1).** Описан фитоценоз (*Gongolaria barbata*)–*Phyllophora crispa*–*Gelidium spinosum*. В 1997 г. его биомасса снижалась вдвое при увеличении глубины, при этом вклад представителя 1-го яруса уменьшался в 1,5 раза, тогда как эдификатора 2-го яруса – во столько же раз возрастал (табл. 1). В составе сообщества были обнаружены *Ericaria crinita*, *Cladostephus spongiosus* (Huds.) C. Ag., *Ulva rigida*. В 1964 г. биомасса альгоценоза снижалась в 1,5 раза при увеличении глубины и была в 2–3 раза выше, чем эти показатели в 1997 г. (табл. 1). Доля эдификаторов 1-го и 2-го ярусов в целом была также выше по сравнению с этими же значениями в 1997 г. Характерно, что эпифитные водоросли практически отсутствовали (табл. 1). Однако, если в 1997 г. выявлена сложная структура фитоценоза с высоким вкладом сопутствующих видов, то в 1964 г. их было значительно меньше, о чём свидетельствуют значения индекса видового разнообразия Шеннона (табл. 2).

**Донный природный комплекс подводного склона, сложенного грубообломочными отложениями, где преобладает вид рода *Dictyota* (4), отмечен в ландшафтной структуре только в 2017 г. Он занимает глубины 10–15 м (рис. 2,**

табл. 1). Описан фитоценоз *Dictyota* sp. Его биомасса низкая, при этом на долю эдификатора приходится 50% биомассы макрофитов. В составе сообщества зарегистрированы *Ericaria crinita*, *Gongolaria barbata*, *Cladostephus spongiosus*, *Chondria capillaries*, *Osmundea pinnatifida* (Huds.) Stackh. Эпифитная сингузия представлена в основном *Callithamnion corymbosum* (Smith) Lyngb. (14% биомассы макрофитов). Значения индекса Шеннона свидетельствуют о сложной структуре фитоценоза, где отмечен высокий вклад сопутствующих и эпифитирующих видов водорослей (табл. 2).

**Донный природный комплекс слабонаклонной равнины, сложенной гравийно-песчаными с битой ракушей отложениями, с доминированием *Phyllophora crispa* (5) в 2017 г. выделен на глубине свыше 15 м (рис. 2, табл. 1).** Описан фитоценоз *Phyllophora crispa*. Его биомасса низкая, преобладает эдификатор сообщества (табл. 1). В составе альгоценоза встречается глубоководный вид *Zanardinia typus* (Nardo) P.C. Silva. Среди эпифитов господствует *Ectocarpus siliculosus* (3% общей биомассы макрофитов). Значения индекса Шеннона свидетельствуют о невысоком видовом разнообразии сообщества (табл. 2). Этот ДПК был зарегистрирован в 1964 г. на глубине 10–15 м. Биомасса фитоценоза и доля доминирующего вида были высокие (табл. 1). В составе сообщества отмечены *Cladostephus spongiosus* и *Dictyota* sp. Эпифитные водоросли отсутствовали. Значение индекса Шеннона свидетельствует об олигодоминантной структуре альгоценоза (табл. 2).

Таким образом, анализ полученных материалов показал, что за период исследований наименьшие изменения претерпели ДПК с доминированием *Ericaria crinita* и *Gongolaria barbata*, которые коснулись лишь конфигурации границ и глубины распространения, что, вероятно, связано в первую очередь с устойчивостью литогенной основы, являю-

Таблица 2 / Table 2

Изменение значений индекса видового разнообразия Шеннона у мыса Коса Северная по глубинам и годам / Changes in the values of the Shannon index of species diversity at Cape Kosa Severnaya by depth and year

Год Year	Глубина, м / Depth, m					
	0,5	1	3	5	10	15
1964	–	0,46	0,45	0,68	0,98	0,99
1997	0,77	2,31	1,58	1,93	2,48	–
2006	0,87	2,03	2,43	1,90	1,84	–
2017	0,45	0,35	1,23	1,90	1,77	0,32

Примечание: «–» – донная растительность отсутствует.

Note: “–” – bottom vegetation is absent.

щейся субстратом для прочного прикрепления макрофитов. Плотность зарослей этих видов была достаточно высокой, хотя увеличение их биомассы отмечали только до глубины 10 м, тогда как на глубине 10–15 м количественные показатели *E. crinita* и *G. barbata* резко снижались, а на глубине 15–20 м они не обнаружены (табл. 1). В конце прошлого столетия подобные изменения для этих фитоценозов описаны для крымского побережья, где регистрировали повышение уровня эвтрофирования водных масс [4]. Так, если в 60–70-х гг. прошлого века нижняя граница произрастания *E. crinita* и *G. barbata* у берегов Крыма была зафиксирована на глубине 18–20 м, то к настоящему времени на этих глубинах она почти полностью исчезла [5, 6].

Наиболее существенная трансформация растительной компоненты ДПК произошла на глубине 5(10)–15 м. Показательно, что в 1997 и 2006 гг. на глубине 10 м располагалась нижняя граница фитали.

Более 50-ти лет назад в ДПК слабонаклонной равнины, сложенной гравийно-песчаными с битой ракушкой отложениями, с доминированием *Phyllophora crispa* (5) на глубине 10–15 м были отмечены сравнительно значительные скопления господствующего вида, тогда как в 2017 г. на этих глубинах он был представлен единичными экземплярами (табл. 1). Известно, что в 60-х гг. прошлого века экологический оптимум *Phyllophora crispa* находился на глубине 18–25 м [6].

Для черноморского побережья Крыма в 60-х гг. прошлого столетия на глубине свыше 25 м были описаны фитоценозы с участием *Zanardinia typus* и *Carradoriella elongata*. В настоящее время в районе мыса Коса Северная эти виды встречаются в ДПК (4 и 5) на глубине 10–15 м. Характерно, что в 1964 г. на этих глубинах они не были обнаружены, что свидетельствует о вертикальном изменении глубин их обитания, которое, вероятно, связано с уменьшением освещённости [5, 6].

Большинство исследователей связывают перестройку и трансформацию донной растительности на черноморском шельфе с ухудшением качества среды, снижением прозрачности воды, что в свою очередь обусловлено эвтрофикацией, а также увеличением рекреационной нагрузки [5].

В последние годы на состояние исследуемого побережья существенное негативное воздействие оказывает застройка побережья, которое приводит к активизации оползневых процессов и разрушению береговой зоны, что

вызывает деградацию биоценозов. Кроме этого, для изучаемой акватории характерна сложная картина перераспределения объёмов наносов, где направление и интенсивность вдольбереговых потоков зависит от ветроволнового режима на прилегающей акватории [9]. В связи с этим ДПК, расположенные в динамически активных зонах, крайне неустойчивы, их характеристики и пространственное распределение макрофитов в значительной степени зависят от значений действующих факторов, из которых основными считаются гидродинамические и литодинамические процессы.

Косвенно о повышении уровня трофности среды у мыса Коса Северная свидетельствует индекс видового разнообразия, который был минимальным в 1964 г. (0,71), резко возрос в 1997 и 2006 гг. (1,81), несколько снизился в 2017 г. (1,00). Однако условия прибрежной зоны соответствуют слабоэвтрофным, на что указывает высокое флористическое разнообразие водорослей и хорошая степень сохранности фитоценозов в интервале глубин 0,5–10 м. Подтверждением нашего предположения могут служить сведения об отнесении этой акватории к условно-чистым (величина  $E-TRIX < 4$ ) [10].

Показательно, что в составе донной растительности изучаемого участка встречаются виды макрофитов, занесённые в списки Красной книги Российской Федерации [11] и Красной книги Севастополя [12] – *Phyllophora crispa*, *Stilophora tenella*. К охраняемым сообществам относятся фитоценозы *E. crinita* и *G. barbata* и *Phyllophora* spp. [13].

На уникальность этого участка севастьяпольского взморья указано в работе [8] ещё в 60-х гг. прошлого столетия. В начале 2000-х гг. рядом авторов дано научное обоснование о создании гидрологического памятника природы «Прибрежный аквальный комплекс у мыса Коса Северная» [14]. Однако не смотря на природоохранную ценность исследуемого побережья, объект до сих пор не создан. Актуальной задачей изучения являлось выявление приоритетных акваторий для заповедания, с учётом природных и социально-экономических особенностей региона, для формирования репрезентативной морской экологической сети.

### Заключение

В ландшафтной структуре прибрежной зоны у мыса Коса Северная за период с 1964 по 2017 гг. были выделены ДПК с участием

доминирующих видов макрофитов (*Ericaria crinita*, *Gongolaria barbata* и *Phyllophora crispa*), описано пять фитоценозов. Показано, что за более чем 50 лет в ДПК глыбово-валунного бенча с преобладанием *E. crinita* зарегистрировано резкое увеличение биомассы фитоценоза, при этом доля его эдификатора оставалась высокой. Максимальный вклад эпифитной синузии в биомассу альгоценоза за весь период изучения был отмечен в 2006 г.

Для ДПК подводного склона, сложенного грубообломочными отложениями, с доминированием *E. crinita* и *G. barbata* зафиксировано увеличение биомассы фитоценоза только на верхней границе. За период с 1964 по 2017 гг. максимальная доля эдификаторов 1-го яруса зафиксирована в 1964 г., а минимальные вклады эпифитов в биомассу сообщества отмечены в 1964 и 1997 гг., а наибольший – в 2006 г.

Для ДПК слабонаклонной равнины, сложенной гравийно-песчаными с битой ракушкой отложениями с доминированием *Phyllophora crispa* характерно катастрофическое снижение продукционных показателей фитоценоза и его эдификатора. Биомасса макрофитов уменьшилась более чем на порядок.

Высокая степень сохранности коренных фитоценозов, наличие краснокнижных видов позволяют рекомендовать акваторию у мыса Коса Северная как перспективный для заповедания участок прибрежной зоны.

*Работа выполнена в рамках государственного задания ФИЦ ИнБЮМ (№ гос. регистрации 121030300149-0).*

*This work was carried out within the framework of the government task in A. O. Kovalevsky Institute of Biology of the Southern Seas of the Russian Academy of Sciences (No. 121030300149-0).*

## Литература

- Петров К.М. Подводные ландшафты: теория, методы исследования. Л.: Наука, 1989. 126 с.
- Евстигнеева И.К., Евстигнеев В.П., Танковская И.Н. Альгоценозы обрастания берегового гидротехнического сооружения в условиях штормовой деятельности (Крым, Чёрное море) // Теоретическая и прикладная экология. 2020. № 3. С. 126–132.
- Панкеева Т.В., Миронова Н.В. Запасы макрофитов как показатель состояния подводных ландшафтов (Чёрное море) // Вестник Московского университета. Серия 5. География. 2019. № 6. С. 102–112.
- Папунов Д.В. Макрофитобентос как индикатор динамики подводных ландшафтов береговой зоны моря

[Электронный ресурс] <http://algae.ru/121> (Дата обращения: 15.05.2021).

- Pankeeva T.V., Mironova N.V. Spatiotemporal changes in the macrophytobenthos of Laspi Bay (Crimea, Black Sea) // Oceanology. 2019. V. 59. No. 1. P. 86–98.
- Калугина-Гутник А.А. Фитобентос Чёрного моря. Киев: Наукова думка, 1975. 248 с.
- Guiry M.D., Guiry G.M. Algae Base. World-wide electronic publication, National University of Ireland, Galway, 2022 [Электронный ресурс] <https://www.algaebase.org> (Дата обращения: 29.03.2022).
- Калугина-Гутник А.А., Куликова Н.М. Донная растительность у западного побережья Крыма // Биология моря. Киев: Наукова думка, 1974. Вып. 32. С. 111–132.
- Горячкин Ю.Н., Долотов В.В. Морские берега Крыма. Севастополь: Колорит, 2019. 256 с.
- Рябушко В.И., Щуров С.В., Ковригина Н.П., Лисицкая Е.В., Поспелова Н.В. Комплексные исследования экологического состояния прибрежной акватории Севастополя (Западный Крым, Чёрное море) // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон моря. 2020. № 1. С. 103–118.
- Красная книга Российской Федерации (растения и грибы). М.: Товарищество научных изданий КМК, 2008. 885 с.
- Красная книга Севастополя. Калининград: Издательский Дом «РОСТ-ДОАФК», 2018. 432 с.
- Gubbay S., Sanders N., Haynes T., Janssen J.A.M., Rodwell J.R., Nieto A., García Criado M., Beal S., Borg J., Kennedy M., Micu D., Otero M., Saunders G., Calix M. European Red List of habitats. Part 1. Marine habitats. Luxembourg: Publications Office of the European Union, 2016. 52 p.
- Мильчакова Н.А., Александров В.В., Бондарева Л.В., Панкеева Т.В., Чернышева Е.Б. Морские охраняемые акватории Крыма: научный справочник. Симферополь: Орианда, 2015. 312 с.

## References

- Petrov K.M. Submerged Landscapes: theory and study. Leningrad: Nauka, 1989. 126 p. (in Russian).
- Evstigneeva I.K., Evstigneev V.P., Tankovskaya I.N. Alcocenoses of fouling of onshore hydraulic structures under conditions of storm (Crimea, the Black Sea) // Theoretical and Applied Ecology. 2020. No. 3. P. 126–132 (in Russian). doi: 10.25750/1995-4301-2020-3-126-132
- Pankeeva T.V., Mironova N.V. Reserves of macrophytes as an indicator of the state of underwater landscapes (the Black Sea) // Vestnik Moskovskogo universiteta. Seriya 5. Geografiya. 2019. No. 6. P. 102–112 (in Russian).
- Papunov D.V. Macrophytobenthos as an indicator of dynamics of submerged landscapes of the coastal zone of a sea [Internet resource] <http://algae.ru/121> (Accessed: 15.05.2021) (in Russian).

5. Pankeeva T.V., Mironova N.V. Spatiotemporal changes in the macrophytobenthos of Laspi Bay (Crimea, Black Sea) // *Oceanology*. 2019. V. 59. No. 1. P. 86–98. doi: 10.1134/S0001437019010168
6. Kalugina-Gutnik A.A. Phytobenthos of the Black Sea. Kiev: Naukova dumka, 1975. 248 p. (in Russian).
7. Guiry M.D., Guiry G.M. Algae Base. World-wide electronic publication, National University of Ireland, Galway, 2022 [Internet resource] <https://www.algaebase.org> (Accessed: 29.03.2022).
8. Kalugina-Gutnik A.A., Kulikova N.M. Bottom vegetation off the western coast of Crimea // *Biologiya morya*. Kiev: Naukova dumka, 1974. No. 32. P. 111–132 (in Russian).
9. Goryachkin Yu.N., Dolotov V.V. Sea coasts of Crimea. Sevastopol: Colorit, 2019. 256 p. (in Russian).
10. Ryabushko V.I., Shchurov S.V., Kovrigina N.P., Lisitskaya E.V., Pospelova N.V. Comprehensive research of the environmental status of coastal waters of Sevastopol (Western Crimea, Black Sea) // *Ekologicheskaya bezopasnost pribrezhnoy i shelfovoy zony morey*. 2020. No. 1. P. 103–118 (in Russian). doi: 10.22449/2413-5577-2020-1-103-118
11. The Red Book of the Russian Federation (Plants and Mushrooms). Moskva: KMK Scientific Press Ltd., 2008. 885 p. (in Russian).
12. The Red Book of the Sevastopol. Sevastopol: “ROST-DOAFK”, 2018. 432 p. (in Russian).
13. Gubbay S., Sanders N., Haynes T., Janssen J.A.M., Rodwell J.R., Nieto A., García Criado M., Beal S., Borg J., Kennedy M., Micu D., Otero M., Saunders G., Calix M. European Red List of habitats. Part 1. Marine habitats. Luxembourg: Publications Office of the European Union, 2016. 52 p.
14. Milchakova N.A., Aleksandrov V.V., Bondareva L.V., Pankeeva T.V., Chernysheva E.B. Marine protected waters of the Crimea: a scientific reference. Simferopol: Orianda, 2015. 312 p. (in Russian).

## Загрязнение воздушной среды формальдегидом и оценка риска канцерогенных эффектов

© 2023. В. А. Седых<sup>1</sup>, аспирант, м. н. с., С. А. Куролап<sup>1</sup>, д. г. н., зав. кафедрой,  
Л. Н. Беляева<sup>2</sup>, к. г. н., доцент, Г. И. Мазуров<sup>3</sup>, д. г. н., профессор,  
А. Т. Козлов<sup>4</sup>, д. б. н., профессор, В. П. Закусилов<sup>4</sup>, к. г. н., доцент,

<sup>1</sup>Воронежский государственный университет,  
394018, Россия, г. Воронеж, Университетская площадь, д. 1,

<sup>2</sup>Липецкий государственный педагогический университет  
имени П. П. Семёнова-Тян-Шанского,  
398020, Россия, г. Липецк, ул. Ленина, д. 42,

<sup>3</sup>Главная геофизическая обсерватория имени А. И. Воейкова,  
194021, Россия, г. Санкт-Петербург, ул. Карбышева, д. 7,

<sup>4</sup>Военный учебно-научный центр военно-воздушных сил  
«Военно-воздушная академия имени  
профессора Н. Е. Жуковского и Ю. А. Гагарина»,  
394064, Россия, г. Воронеж, ул. Старых Большевиков, д. 54а,  
e-mail: vladsedykh48@mail.ru, skurolap@mail.ru, geolspu@mail.ru,  
nanmaz@rambler.ru, zakusilov04@yandex.ru

В статье представлены результаты исследований по оценке содержания формальдегида в атмосфере г. Липецка, связи концентраций с метеопараметрами и оценка канцерогенных рисков для населения. Выявлены закономерности годовой и суточной динамики поллютанта, пиковые значения которого приходятся на тёплый период года (май – сентябрь), а в суточном ходе на дневные и вечерние часы (13:00 и 19:00). Связь концентраций с метеопараметрами показывает явную тенденцию увеличения концентраций формальдегида с ростом температуры воздуха, а с повышением силы ветра и влажности воздуха концентрация, наоборот, снижается. Расчёт индивидуальных канцерогенных рисков для здоровья населения показал значение  $6 \cdot 10^{-5}$ , что соответствует предельно допустимому риску. Наиболее неблагоприятная ситуация складывается в Тракторном районе города (вблизи металлургического комбината) и на территориях, прилегающих к основным оживлённым перекрёсткам города (перекрёсток Кольцо трубного завода). При оценке популяционных рисков установлено, что присутствие канцерогена в атмосферном воздухе данных районов может провоцировать 5–6 дополнительных случаев злокачественных новообразований.

**Ключевые слова:** загрязнение воздуха, формальдегид, канцерогенные риски, метеопараметры, атмосферный воздух.

## Formaldehyde air pollution and risk assessment of carcinogenic effects

© 2023. V. A. Sedykh<sup>1</sup> ORCID: 0000-0003-4071-2638, S. A. Kurolap<sup>1</sup> ORCID: 0000-0002-6169-8014,  
L. N. Belyaeva<sup>2</sup> ORCID: 0000-0003-3566-7297, G. I. Mazurov<sup>3</sup> ORCID: 0000-0002-8669-612X,  
A. T. Kozlov<sup>4</sup> ORCID: 0009-0002-1928-7059, V. P. Zakusilov<sup>4</sup> ORCID: 0000-0003-4615-6636

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

1, University Square, Voronezh, Russia, 394018,

<sup>2</sup>Lipetsk State Pedagogical University named after P. P. Semenov-Tyan-Shansky,  
42, Lenina St., Lipetsk, Russia, 398020,

<sup>3</sup>The Voeikov Main Geophysical Observatory,

7, Karbysheva St., Saint Peterburg, Russia, 194021,

<sup>4</sup>Military Educational and Scientific Center

of the Air Force “N. E. Zhukovsky and Y. A. Gagarin Air Force Academy”,  
54a, Starykh Bolshevikov St., Voronezh, Russia, 394064,

e-mail: vladsedykh48@mail.ru, skurolap@mail.ru, geolspu@mail.ru,  
nanmaz@rambler.ru, zakusilov04@yandex.ru



This article discusses the issues of air pollution with formaldehyde and the impact of this pollutant on the health of the population of the city of Lipetsk. The study revealed patterns of increase in the concentration of formaldehyde in the warm season (May–September). In the daily dynamics of concentrations, peak values occur during daytime and evening hours, which is associated with the cumulative effect of pollution and traffic congestion in the evening rush hour. The minimum values are recorded in the cold season and in the morning hours. The morning “rush hour” does not affect the concentrations as the sampling takes place earlier. It has been established that meteorological conditions influence the concentration of formaldehyde. An increase in air temperature correlates with an increase in the concentration of formaldehyde, especially in the daytime and evening hours, which is explained by increased solar insolation and warming of the atmospheric air. An increase in wind strength and air humidity, on the contrary, reduces the content of pollutants in the air. An assessment of the impact of formaldehyde on the health of the population, associated with the presence of a carcinogen in the atmosphere, showed that the city of Lipetsk is characterized by the maximum acceptable risk. The individual carcinogenic risk for the Traktorny District and areas near busy highways (the Ring of the Pipe Plant intersection) is  $6 \cdot 10^{-5}$ . This level of risk is assessed as the maximum acceptable. In these areas, the presence of formaldehyde in the air can provoke 5–6 additional cases of oncological diseases per year. Such values require monitoring and implementation of measures to reduce the negative impact.

**Keywords:** air pollution, formaldehyde, carcinogenic risks, meteorological conditions, atmosphere.

Одним из важнейших экологических вопросов в настоящее время является качество городской среды обитания. Среди многофакторного воздействия на урбанизированные территории ключевую роль играет загрязнение воздушного бассейна, обусловленное выбросами промышленности и автотранспорта. В условиях загрязнённой среды при постоянном ингаляторном воздействии создаётся потенциальный риск для здоровья городского населения. В особенности это характерно для крупных промышленных городов, где концентрация производств и плотность дорожно-уличной сети наибольшая.

Потенциальная опасность, связанная с наличием в атмосферном воздухе загрязняющих веществ прежде всего зависит от концентраций и токсичности поллютантов. Среди широкого спектра загрязнителей, оказывающих негативное воздействие на организм и здоровье человека, особое место занимают вещества, обладающие канцерогенными эффектами. В частности, к таким веществам относится формальдегид, присутствие которого повышает риск возникновения злокачественных новообразований у населения, проживающего в зоне воздействия.

В последние годы проблема формальдегидного загрязнения всё чаще обсуждается в работах отечественных и зарубежных авторов. Исследования, проведённые в городах Воронеже [1], Томске [2], Москве [3], Ижевске [4], Норильске, [5], Кирове и Ухте [6], а также в иностранных городах [7], показывают характерную картину повышенного содержания поллютанта как в примагистральных и промышленных зонах, так и в зонах жилой застройки, что является наиболее опасным фактором для здоровья населения, проживающего на территориях,

подверженных формальдегидному загрязнению воздушной среды.

Целью данного исследования является оценка уровней и динамики загрязнения воздушной среды города Липецка формальдегидом, анализ связи содержания поллютанта в приземном слое атмосферного воздуха с метеорологическими параметрами и оценка канцерогенного риска для населения города Липецка.

### Объект и методы исследования

Объектом исследования выбран г. Липецк – крупный промышленный и экономический центр Центрального Черноземья. Валовая эмиссия загрязняющих веществ в атмосферу города в 2020 г. составила 270,3 тыс. т, что является одним из наибольших показателей в Российской Федерации [8, 9]. В отраслевой структуре г. Липецк имеет ярко выраженную специализацию на производстве чёрных металлов. На территории города расположен один из крупнейших в стране металлургических комбинатов полного цикла – «Новолипецкий металлургический комбинат» (НЛМК), доля выбросов которого составляет 96% от общей эмиссии города. Помимо НЛМК, промышленный каркас города представлен предприятиями химической, машиностроительной, пищевой промышленности, производством строительных материалов и конструкций, крупными объектами энергетики и жилищно-коммунального хозяйства. Также непосредственно к юго-восточной границе города прилегает территория особой экономической зоны федерального значения «Липецк», которая включает несколько десятков резидентов, специализирующихся на разных отраслях производства, в том числе на хими-

ческой, стекольной, машиностроительной промышленности и производстве строительных материалов и конструкций.

Для анализа и оценки загрязнения воздушной среды г. Липецка и связи концентраций формальдегида с метеорологическими параметрами были использованы фондовые данные Липецкого центра по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды – филиала ФГБУ «Центрально-Чернозёмное управление по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды» (Липецкий ЦГМС) за 2018–2020 гг. Мониторинг загрязнения воздушной среды на постах наблюдения за атмосферой (ПНЗ) осуществляется по полной программе – 4 раза в сутки в 01:00, 07:00, 13:00 и 19:00 ч. Формальдегид контролируется на 4 постах из 5 (ПНЗ №№ 2, 4, 6, 8), расположенных в разных частях города. Для оценки зависимости между концентрациями формальдегида и метеопараметрами был проведён расчёт корреляционных связей ( $r$  – коэффициент линейной корреляции).

Также были проведены натурные измерения концентраций формальдегида в приземном слое атмосферного воздуха с помощью переносного газоанализатора ГАНК-4 (А), который позволяет фиксировать максимально разовые значения данного поллютанта в атмосфере. Измерения были произведены в сентябре 2021 г. на 61-ом мониторинговом участке, расположенном на территории г. Липецка, в соответствии с [10] и с учётом функциональных зон города. По данным натурных измерений построена карта основных зон загрязнения формальдегидом территории города. Картографический материал создан на базе геоинформационной системы QGis 3.10 интерполированием методом обратных взвешиваний.

Оценка индивидуальных канцерогенных рисков для здоровья населения осуществлялась с использованием фондовых данных Липецкого ЦГМС и базировалась на подходах, изложенных в [11]. Канцерогенный риск оценивали по формуле (1):

$$CR = ADD \cdot SF, \quad (1)$$

где  $ADD$  – средняя суточная доза в течение жизни, мг/(кг · день);  $SF$  – фактор канцерогенного потенциала, (кг · день)/мг.

Полученные результаты сопоставлены с критериями приемлемости (безопасности) канцерогенного риска: риск, равный или меньший  $1 \cdot 10^{-6}$  – допустимый риск; от  $1 \cdot 10^{-6}$

до  $1 \cdot 10^{-4}$  – предельно допустимый риск, вызывающий беспокойство; от  $1 \cdot 10^{-4}$  до  $1 \cdot 10^{-3}$  – приемлем для профессиональных групп, но неприемлем для населения в целом (опасный риск); риск равный или более  $1 \cdot 10^{-3}$  – неприемлем ни для населения, ни для профессиональных групп (чрезвычайно опасный риск).

Оценка популяционных канцерогенных рисков, позволяющих определить дополнительное число случаев злокачественных новообразований, связанных с воздействием на протяжении всей жизни исследуемого загрязнителя, основывалась на [11] и рассчитывалась по формуле (2):

$$PCR = CR \cdot (POP/70), \quad (2)$$

где  $CR$  – индивидуальный канцерогенный риск;  $POP$  – численность исследуемой популяции, человек.

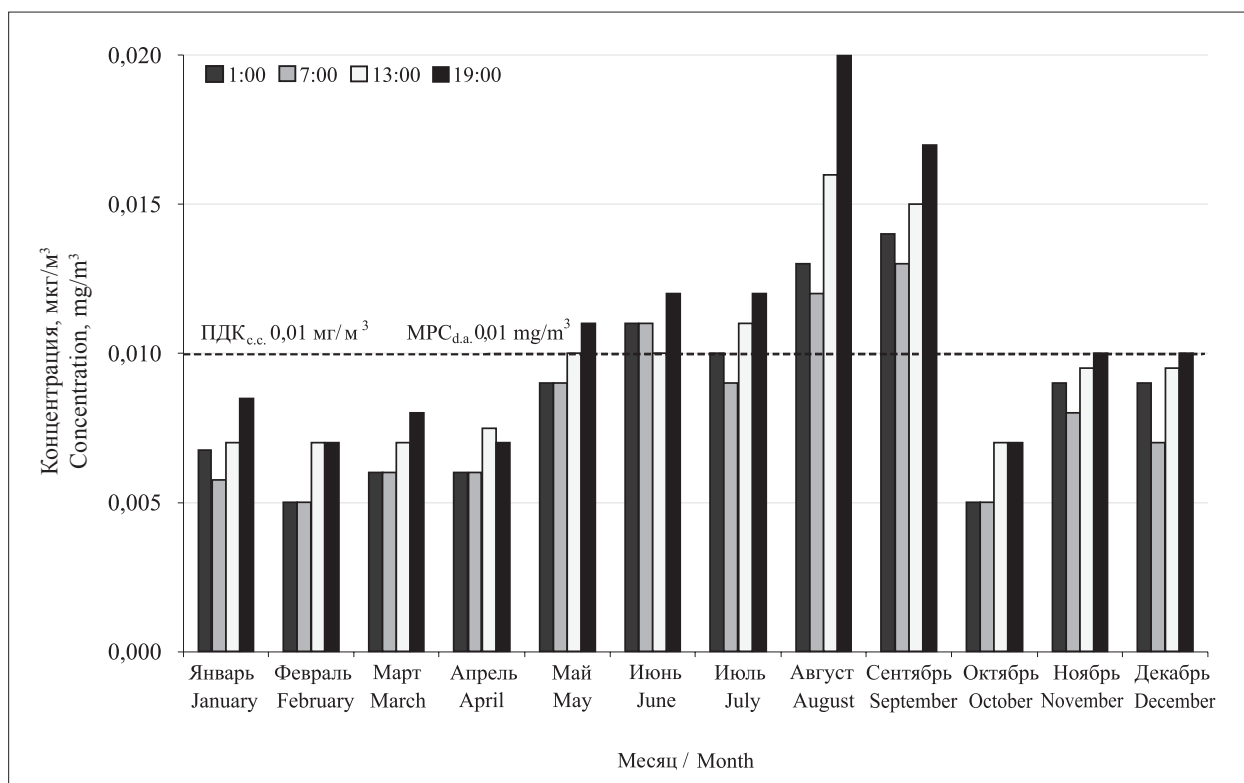
### Результаты и обсуждение

Анализ и оценка загрязнения формальдегидом окружающей среды г. Липецка позволяет выявить основные закономерности динамики и пространственного распространения канцерогена. За 3-х летний период наблюдений (2018–2020 гг.) на ПНЗ Липецкого ЦГМС превышений максимально разовых предельно допустимых концентраций ( $ПДК_{м.р.}$ ) зафиксировано не было. Наиболее высокие значения, равные  $1 ПДК_{м.р.}$ , наблюдались на ПНЗ № 4 (Тракторный район), расположенном вблизи НЛМК.

Однако, несмотря на то, что максимально разовые значения за данный период не превышали допустимого уровня, для относительных среднесуточных концентраций отмечены превышения. Годовая и суточная динамика концентраций формальдегида представлена на рисунке.

Потенциально опасным фактором является систематическое превышение среднесуточной  $ПДК$  ( $ПДК_{с.с.}$ ) в отдельные месяцы и периоды. Согласно полученным данным (рис.), наиболее высокие концентрации формальдегида наблюдаются в тёплый период года (май–сентябрь). Минимальные характерны для холодного периода (январь–март).

В суточном ходе пик концентраций приходится на вечерние часы. Такие показатели, наиболее вероятно, связаны аккумулятивным эффектом накопления загрязнения и вечерним «часом-пик» на дорогах города, который



**Рис.** Концентрация формальдегида по месяцам в разное время суток  
**Fig.** Formaldehyde concentration by month at different times of the day

растягивается с 16:30 до 19:30 ч. Минимальные значения наблюдаются в утренние часы (07:00). Утренний «час-пик», который длится с 07:00 до 09:00 ч, ещё не оказывает своего влияния на результаты анализа проб на ПНЗ.

Наиболее высокие концентрации формальдегида характерны для ПНЗ № 4 (Тракторный район, вблизи НЛМК) и ПНЗ № 2 (вблизи одного из наиболее оживлённых перекрёстков города – Кольца трубного завода).

В результате натурных измерений концентраций формальдегида в приземном слое атмосферы были выявлены превышения ПДК<sub>м.р.</sub> на 7 мониторинговых участках в пределах от 1,2 до 2,5 раз. Наибольшие показатели зафиксированы на мониторинговых участках: проспект Мира (2,4 ПДК<sub>м.р.</sub>), ул. Краснознамённая (2,15 ПДК<sub>м.р.</sub>), ул. Краснозаводская (2,5 ПДК<sub>м.р.</sub>) – мониторинговые участки вблизи НЛМК; перекрёсток Кольца трубного завода (2,2 ПДК<sub>м.р.</sub>). Остальные превышения были зафиксированы вблизи оживлённых городских дорог в правобережной части города. Основными зонами загрязнения формальдегидом являются территории, прилегающие к НЛМК, а также наиболее оживлённые участки дорожной сети, что соотносится с данными наблюдения на постах Липецкого ЦГМС.

Важным фактором, влияющим на содержание формальдегида в атмосферном воздухе, является вторичное загрязнение – образование загрязняющего вещества под воздействием метеорологических условий, солнечной радиации и состояния атмосферы. Данную зависимость в своих работах отмечают многие исследователи. Как показано в работах [12, 13], формальдегид образуется при фотоокислении различных органических соединений в присутствии оксидов азота. Обычно это происходит в безветренную ясную погоду, когда метеорологические условия способствуют накоплению примесей и последующей фотохимической трансформации.

Для анализа связи между метеопараметрами и концентрациями формальдегида в г. Липецке был проведён расчёт коэффициента линейной корреляции (табл.). Результаты показывают, что наиболее значимая положительная связь прослеживается между содержанием в атмосфере исследуемого поллютанта и температурой воздуха. С ростом температуры происходит и рост концентраций формальдегида. В особенности это характерно для тёплого периода года и дневного времени, когда температуры и солнечная радиация максимальны.

Зависимость между скоростью ветра и влажностью воздуха по отношению к кон-

центрациям канцерогена характеризуется обратной направленностью. При повышении силы ветра и влажности воздуха содержание формальдегида снижается, что обусловлено повышенной способностью атмосферы к самоочищению в такие периоды.

Завершающим этапом исследования являлось определение индивидуального и популяционного канцерогенного риска для здоровья городского населения г. Липецка, связанного с присутствием формальдегида в атмосферном воздухе. Полученные расчётные значения показали, что индивидуальный канцерогенный риск составляет  $6 \cdot 10^{-5}$ , что находится в пределах второго диапазона критериев приемлемости и соответствует предельно допустимому риску, вызывающему беспокойство при воздействии загрязнителя в течение всей жизни человека.

Наиболее неблагоприятными районами города в данном аспекте являются Тракторный район (ПНЗ № 4) и территории, прилегающие к наиболее оживлённым городским перекрёсткам, включая примагистральные жилые массивы (в особенности в районе Кольца трубного завода – ПНЗ № 2), что связано с наибольшими, относительно остальной территории города, концентрациями формальдегида в атмосферном воздухе. По расчётным экспертным оценкам численность населения, проживающего в районах расположения данных ПНЗ, составляет порядка 100 тыс. человек [14]. Согласно расчёту по формуле 2, постоянное воздействие концентраций формальдегида, содержащегося в атмосферном воздухе г. Липецка в этих районах, может вызывать появление 5–6 дополнительных случаев онкологических заболеваний в год.

### Заключение

По результатам проведённого исследования можно сделать следующие обобщающие выводы.

1. Максимальные значения концентраций формальдегида в атмосферном воздухе г. Липецка наблюдаются в тёплый период года (май–сентябрь) с пиковыми значениями в августе и сентябре, что обусловлено преимущественно антициклональным типом погоды и соответствующим температурным режимом в эти месяцы. В суточном ходе концентраций наблюдается явная закономерность увеличения содержания формальдегида в атмосфере в дневные и вечерние часы. Данный факт может быть обусловлен повышенной солнечной радиацией, проявлением кумулятивного эффекта накопления примесей, а также увеличением трафика на дорогах города во время вечернего «часа пик».

Влияние метеопараметров на концентрации поллютанта характеризуется ярко выраженной закономерностью увеличения содержания примеси с ростом температуры воздуха, в то время как при повышении скорости ветра и относительной влажности, наоборот, отмечено снижение концентрации формальдегида в воздухе.

2. Выявлено, что присутствие в атмосферном воздухе г. Липецка формальдегида потенциально провоцирует 5–6 дополнительных случаев онкологических заболеваний в год. Данный риск вызывает беспокойство и требует постоянного контроля и проведения систематических мероприятий по снижению негативного воздействия формальдегида на городскую среду обитания. Наиболее неблаго-

Таблица / Table

Степень корреляционных связей (%) между метеопараметрами и концентрациями формальдегида  
The degree of correlation (%) between meteorological parameters and formaldehyde concentrations

Степень и направленность корреляционной связи The degree and direction of the correlation	Температура воздуха Air temperature				Скорость ветра Wind speed				Относительная влажность воздуха Relative humidity			
	Время наблюдений / Observation time											
	1:00	7:00	13:00	19:00	1:00	7:00	13:00	19:00	1:00	7:00	13:00	19:00
Средняя положительная Average positive	41,6	29,2	66,7	58,3	12,5	8,4	8,3	4,1	8,3	8,3	4,2	12,5
Средняя отрицательная Average negative	4,2	0,0	7,2	0,0	29,0	12,5	21,0	29,1	25,0	33,3	25,0	25,0

приятная ситуация по содержанию формальдегида в воздухе складывается в Тракторном районе, прилегающем к НЛМК, и на при магистральных территориях вблизи Кольца трубного завода. Также повышенное содержание формальдегида отмечается и на других оживлённых участках дорожно-уличной сети города.

Таким образом, для улучшения качества городской среды необходима разработка и реализация целенаправленной экологической политики и административных решений с целью снижения негативного воздействия на воздушный бассейн и охраны здоровья городского населения.

*Исследование выполнено при финансовой поддержке Российского научного фонда в рамках научного проекта № 20-17-00172.*

### Литература

1. Куролап С.А., Петросян В.С., Клепиков О.В., Кульнев В.В., Мартынов Д.Ю. Оценка влияния метеорологических параметров на техногенное загрязнение канцерогенно опасными химическими веществами воздушного бассейна города Воронежа // Экология и промышленность России. 2021. Т. 25. № 2. С. 60–65.
2. Селегей Т.С., Филоненко Н.Н., Шлычков В.А., Леженин А.А., Ленковская Т.Н. Формальдегидное загрязнение городской атмосферы и его зависимость от метеорологических факторов // Оптика атмосферы и океана. 2013. № 5. С. 422–426.
3. Судакова Е.Д. Многосредовой канцерогенный риск здоровью населения города Москвы // Вопросы управления и социальной гигиены. 2015. № 6 (267). С. 13–16.
4. Малькова И.Л., Семакина А.В. К оценке загрязнения атмосферного воздуха формальдегидом как фактора риска для здоровья детского населения города Ижевска // Вестник ВГУ. Серия: География. Геоэкология. 2017. № 1. С. 55–59.
5. Воробьева И.А. Исследование причин формирования повышенных концентраций формальдегида в атмосфере города // Труды Главной геофизической обсерватории им. А.И. Воейкова. 2008. № 557. С. 206–215.
6. Кузнецова Д.А., Сизова Е.Н., Циркин В.И. Выбор населённых пунктов в качестве модели изучения влияния техногенных и климатогеографических факторов на человека // Теоретическая и прикладная экология. 2015. № 2. С. 34–41.
7. Zhu L., Jacob D.J., Keutsch F.N., Mickley L.J., Scheffe R., Strum M., Gonzalez A.G., Chance K., Yang K., Rappengluck B., Millet D.B., Baasandorj M., Jaegle L., Shah V. Formaldehyde (HCHO) as a hazardous air pollutant: Mapping surface air concentrations from satellite and

inferring cancer risks in the United States // Environmental Science & Technology. 2017. V. 51. P. 5650–5657.

8. Доклад «Состояние и охрана окружающей среды Липецкой области в 2019 году». Липецк: Управление экологии и природных ресурсов Липецкой области, 2020. 224 с.
9. О состоянии и об охране окружающей среды Российской Федерации в 2020 году. Государственный доклад. М.: Минприроды России; МГУ имени М.В. Ломоносова, 2021. 864 с.
10. Руководство по контролю загрязнения атмосферы (РД 52.04.186-89). М., 1991. 694 с.
11. Руководство по оценке риска для здоровья населения при воздействии химических веществ, загрязняющих окружающую среду (Р2.1.10.1920–04). М.: Федеральный центр госсанэпиднадзора Минздрава России, 2004. 143 с.
12. Безуглая Э.Ю., Ивлева Т.П. Формальдегид в атмосфере городов // Вопросы охраны атмосферы от загрязнения. Инф. бюллетень № 1 (2). СПб.: НПК Атмосфера, 2003. С. 73–81.
13. Скубневская Г.И., Дульцева Г.Г. Загрязнение атмосферы формальдегидом: Аналитический обзор. Новосибирск: ГППТБ СО РАН, 1994. 59 с.
14. Государственный доклад «О состоянии санитарно-эпидемиологического благополучия населения в Липецкой области в 2019 году» / Под ред. В.А. Бондарева. Липецк, 2020. 227 с.

### References

1. Kurolap S.A., Petrosyan V.S., Klepikov O.V., Kul'nev V.V., Martynov D.Yu. Evaluation for the influence of meteorological parameters on the technogenic pollution by carcinogenic chemicals in the air basin of Voronezh City // *Ekologiya i promyshlennost' Rossii*. 2021. V. 25. No. 2. P. 60–65 (in Russian). doi: 10.18412/1816-0395-2021-2-60-65
2. Selegey T.S., Filonenko N.N., Shlychikov V.A., Lezenin A.A., Lenkovskaya T.N. Formaldehyde pollution of the urban atmosphere and its dependence on meteorological factors // *Optika atmosfery i okeana*. 2013. V. 26. No. 5. P. 422–426 (in Russian).
3. Sudakova E.D. Multi-environment carcinogenic risk to the population's health in Moscow // *Voprosy upravleniya i sotsialnoy gigieny*. 2015. No. 6 (267). P. 13–16 (in Russian).
4. Mal'kova I.L., Semakina A.V. Assessment of atmospheric air pollution with formaldehyde as a risk factor for the children's health in Izhevsk // *Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Geografiya. Geoekologiya*. 2017. No. 1. P. 55–59 (in Russian).
5. Vorobieva I.A. Study of the reasons for the formation of elevated formaldehyde concentrations in the city atmosphere // *Trudy Glavnoy geofizicheskoy observatorii im. A.I. Voeykova*. 2008. No. 557. P. 206–215 (in Russian).

6. Kuznetsova D.A., Sizova E.N., Tsirkin V.I. Selection of settlements as a model for studying the effect of anthropogenic and climatic and geographical factors on human // Theoretical and Applied Ecology. 2015. No. 2. P. 34–41 (in Russian). doi: 10.25750/1995-4301-2015-2-034-041
7. Zhu L., Jacob D.J., Keutsch F.N., Mickley L.J., Scheffe R., Strum M., Gonzalez A.G., Chance K., Yang K., Rappengluck B., Millet D.B., Baasandorj M., Jaegle L., Shah V. Formaldehyde (HCHO) as a hazardous air pollutant: Mapping surface air concentrations from satellite and inferring cancer risks in the United States // Environmental Science & Technology. 2017. V. 51. P. 5650–5657. doi: 10.1021/acs.est.7b01356
8. The state and environmental protection of the Lipetsk Region in 2019: Report. Lipetsk: Upravlenie ekologii i prirodnikh resursov Lipetskoy oblasti, 2020. 224 p. (in Russian).
9. On the state and protection of the environment of the Russian Federation in 2020. State report. Moskva: Ministry of Natural Resources and Environmental Protection of the Russian Federation, 2021. 864 p. (in Russian).
10. Air pollution control guide (R 52.04.186-89). Moskva, 1991. 694 p.
11. Human health risk assessment from environmental chemicals (R 2.1.10.1920-04). Moskva: Federalnyy tsentr gossanepidnadzora Minzdrava Rossii, 2004. 143 p. (in Russian).
12. Bezuglaya E.Yu., Ivleva T.P. Formaldehyde in the atmosphere of cities // Voprosy okhrany atmosfery ot zagryazneniya. Sankt-Peterburg: NPK Atmosfera, 2003. P. 73–81 (in Russian).
13. Skubnevskaya G.I., Dul'tseva G.G. Formaldehyde air pollution: An analytical review. Novosibirsk: GPPTB SO RAN, 1994. 59 p. (in Russian).
14. State report "On the state of sanitary and epidemiological well-being of the population in the Lipetsk region in 2019" / Ed. V.A. Bondarev. Lipetsk, 2020. 227 p. (in Russian).

## Биоаккумуляция тяжёлых металлов и других токсичных элементов в мышцах рыб бассейна р. Волги

© 2023. А. В. Горбунов<sup>1</sup>, с. н. с., Б. В. Ермолаев<sup>1</sup>, н. с.,  
Д. Б. Петренко<sup>1,2</sup>, к. х. н., н. с., О. И. Окина<sup>1</sup>, к. т. н., в. н. с.,  
Г. А. Грановская<sup>1</sup>, главный специалист,

<sup>1</sup>Геологический институт Российской академии наук,  
119017, Россия, г. Москва, Пыжевский пер., д. 7,

<sup>2</sup>Государственный университет просвещения,  
141014, Россия, г. Мытищи, ул. Веры Волошиной, д. 24,  
e-mail: anatolygor@yandex.ru, dbpetrenko@yandex.ru

Целью настоящей работы было изучение накопления тяжёлых металлов и токсичных элементов в мышцах основных промысловых рыб бассейна р. Волги. Отбор образцов проводили на всём протяжении р. Волги, в районах, которые характеризуются различной степенью развития промышленности. В процессе проведения работы были отобраны образцы тканей основных видов промысловых рыб (всего около 300 образцов). Анализ отобранного материала проведён с помощью масс-спектрометрии с индукционно-связанной плазмой, атомной абсорбции с атомизацией в пламени и атомной абсорбции с «холодным паром». На основании этого анализа определены уровни накопления Cr, Mn, Fe, Co, Ni, Cu, Zn, As, Se, Br, Sr, Cd, Sb, I, Hg, Pb в мышцах основных видов промысловых рыб. Приведены графики распределения концентрации элементов в мышцах окуня в зависимости от района вылова рыбы: максимальная концентрация суммы токсичных элементов в мышцах окуня характерна для Рыбинского водохранилища и района посёлка Цаган-Аман, а минимальная – для верховьев Волги и дельты. Оценена зависимость накопления в мышцах окуня As, Cd, Hg, Se, I и Br от массы рыбы. Обнаружено, что концентрация Hg и Se в мышцах окуня прямо пропорционально зависит от массы рыбы.

**Ключевые слова:** тяжёлые металлы, токсичные элементы, биоаккумуляция, ткани рыб, особенности накопления, р. Волга.

## Bioaccumulation of heavy metals and other toxic elements in the muscles of fish in the Volga River basin

© 2023. A. V. Gorbunov<sup>1</sup> ORCID: 0000-0001-7794-100X,  
B. V. Ermolaev<sup>1</sup> ORCID: 0000-0001-9072-312X, D. B. Petrenko<sup>1,2</sup> ORCID: 0000-0003-0640-5159,  
O. I. Okina<sup>1</sup> ORCID: 0000-0002-1947-4551, G. A. Granovskaya<sup>1</sup> ORCID: 0000-0001-6162-9492

<sup>1</sup>Geological Institute, Russian Academy of Sciences,  
7, Pyzhevsky Pereulok, Moscow, Russia, 119017,

<sup>2</sup>State University of Enlightenment,  
24, Very Voloshinoy St., Mytishchi, Russia, 141014,  
e-mail: anatolygor@yandex.ru, dbpetrenko@yandex.ru

The purpose of this work was to study the accumulation of heavy and toxic elements in the muscles of the main commercial fish of the Volga River basin. Sampling was carried out throughout the Volga River, in areas that are characterized by varying degrees of industrial development. In the course of the work, tissue samples of the main species of commercial fish were selected (about 300 samples in total). The analysis of the selected material was carried out by a set of methods: induction coupled plasma mass spectrometry, flame atomic absorption spectroscopy and cold steam atomic absorption. Based on this analysis, the levels of accumulation of Cr, Mn, Fe, Co, Ni, Cu, Zn, As, Se, Br, Sr, Cd, Sb, I, Hg, Pb in the muscles of the main species of commercial fish were determined. Graphs of the distribution of the concentration of elements in the muscles of perch depending on the area of fishing are given: the maximum concentration of the sum of toxic elements in the muscles of perch is characteristic of the Rybinsk reservoir and the area of the village of Tsagan-Aman, and the minimum – for the upper Volga and delta. The dependence of accumulation of As, Cd, Hg, Se, I and Br in the muscles of perch on the mass of fish has been assessed. It was found that the concentration of Hg and Se in the muscles of the perch is directly proportional to the weight of the fish.

**Keywords:** heavy metals, toxic elements, bioaccumulation, fish tissues, accumulation features, the Volga River.

Загрязнение природной среды представляет серьёзную опасность для биосферы. Антропогенное воздействие приводит к поступлению в водоёмы огромного количества токсических веществ, в том числе тяжёлых металлов. В настоящее время токсичными (в зависимости от уровня концентрации) считаются соединения Cr, Fe, Ni, Cu, Zn, As, Cd, Sb, Hg и Pb. Для тяжёлых металлов в принципе не существует механизмов самоочищения – они лишь перераспределяются из одного резервуара в другой, взаимодействуя с различными категориями живых организмов. Рыбы являются конечными звеньями трофических цепей в водных экосистемах. Именно поэтому в рыбах следует ожидать максимального накопления токсичных веществ. К настоящему моменту накоплен значительный объём данных об их содержании в тканях рыб в различных регионах мира, необходимый для выполнения мониторинга химического состояния водной среды, контроля качества рыбной продукции и оценки поступления токсикантов в организм человека с пищей [1–3].

Достаточно хорошо изучено накопление Hg [4–7] в мышцах рыб Волжских водохранилищ, дельты р. Волги, оз. Байкал. Показано, что аккумуляция ртути рыбами имеет видовую специфику, в частности в тканях хищных рыб – кумже, щуке и окуне содержание ртути выше, чем в бентофагах – сигах и леще [8]. В некоторых случаях – это уровень концентрации, опасный для здоровья человека. Имеются также сведения о концентрации в тканях рыб некоторых токсичных и эссенциальных элементов – Cr, Ni, Fe, Co, Cu, Zn, Se, I [9–14]. Однако в этих сведениях, как правило, отсутствуют данные о концентрации таких токсикантов, как As, Cd, Sb и Pb.

Одним из наиболее значительных источников пресноводной рыбы в европейской части России является р. Волга. Следует отметить, что для областей, относящихся ко всему течению Волги, характерно присутствие антропогенных источников загрязнения. К этим источникам можно отнести всю промышленную агломерацию, расположенную на берегах р. Волги, в которой представлена весьма широкая линейка промышленного производства. Согласно статистическим данным [15–17], в Волжском регионе регулярно потребляют рыбу в среднем до 32% от опрошенных респондентов, а 58% потребляют рыбу не реже 1–2 раз в неделю. Следует отметить, что это официальные данные, основанные на объёмах продаж рыбы и рыбопродуктов через торговые сети. Учёт

объёма индивидуального вылова и потребления рыбы отсутствует полностью. При этом следует отметить, что по неофициальным данным потребление рыбы, полученной в результате индивидуального вылова в Волге, составляет от 18 до 80% от официальных статистических данных. В сумме это достаточно большая часть рыбы и рыбной продукции, потребляемой в регионе, поэтому весьма актуальной является оценка уровня накопления токсичных элементов в тканях рыб, наиболее распространённых в Волжском бассейне.

Цель настоящей работы: оценить накопление тяжёлых металлов и других токсичных элементов в тканях рыбы, выловленной в бассейне р. Волги, и изучить особенности этого накопления некоторыми видами рыб.

### Материалы и методы исследования

Основными промысловыми видами рыб в Волжском бассейне являются плотва, лещ, окунь, сазан, сом, судак и щука [6, 16, 17]. Отлов рыбы производили в течение весенне-летне-осенних сезонов 2019–2020 гг. в основном непосредственно участниками данного проекта, частично недостаток рыбы восполнялся покупкой у местных рыбаков. Районы отбора образцов показаны на рисунке 1. Район № 1 – участок г. Кимры – г. Калязин; район № 2 – Рыбинское водохранилище; район

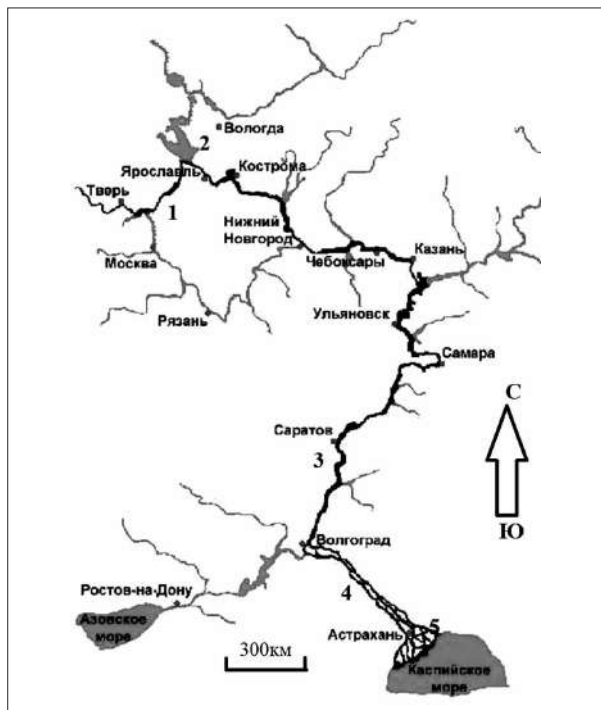


Рис. 1. Районы отбора образцов рыбы (участки 1–5)  
Fig. 1. Fish sampling areas (points 1–5)



Таблица 1 / Table 1

Общий список отобранных образцов / General list of selected samples

№ п/п No.	Объект / Object	Масса, г / Weight, g	
		min-max	средняя / average
1	Лещ ( <i>Abramis brama</i> ), n = 39	100-560	340
2	Окунь ( <i>Perca fluviatilis</i> ), n = 86	12-332	161
3	Плотва ( <i>Rutilus</i> ), n = 28	49-96	75
4	Сазан ( <i>Cyprinus carpio</i> ), n = 17	450-1100	743
5	Сом ( <i>Silurus glanis</i> ), n = 13	1000-2600	1750
6	Судак ( <i>Sander Volgensis</i> ), n = 35	156-533	331
7	Щука ( <i>Esox lucius</i> ), n = 21	90-2700	909

№ 3 – пос. Чардым – г. Саратов; район № 4 – пос. Цаган-Аман – база Лунёвка; район № 5 – база Гандурино. Общий список отобранных образцов с указанием массы рыбы приведён в таблице 1.

Образцы отбирали в полиэтиленовые пакеты типа зип-лок, очищали от внешних загрязнений и промывали дистиллированной водой. Для длительной транспортировки образцы замораживали при температуре -20 °С. Всего было отобрано около 300 образцов. При подготовке к анализу рыбу размораживали и помещали в эмалированные кюветы, после этого вырезали с левой стороны, начиная от спинного плавника до начала рёбер вдоль тела 2–4 г скелетных мышц. Весь инструмент и стеклянную посуду мыли 5–10% азотной кислотой и ополаскивали дистиллированной водой. На анализ образцы поступали с естественным процентом влажности [4, 5].

Содержание Cr, Mn, Co, Ni, Cu, Zn, As, Se, Br, Sr, Cd, Sb, I, Pb в пробах определяли методом масс-спектрометрии с индуктивно-связанной плазмой (ИСП-МС) на масс-спектрометре Element 2 (Thermo Fisher Scientific of GmbH, Германия), содержание Fe – методом атомно-абсорбционной спектрометрии с атомизацией в пламени (ПА-ААС) на спектрометре Квант-2а (КОРТЭЖ, Россия), содержание Hg – методом атомно-абсорбционной спектрометрии холодного пара на анализаторе Юлия 5К, ООО «НПО «Метрология», Россия.

Пробоподготовку образцов к определению микроэлементов методами ИСП-МС и ПА-ААС осуществляли методом микроволнового разложения смесью азотной кислоты и пероксида водорода. Разложение проводили в микроволновой системе резонаторного типа MarsX-MarsX-press (SEM Corp., США). Для подготовки проб использовали сосуды ХР-1500 из фторполимерного материала объёмом 100 мл. Пробоподготовку к определению

ртути в образцах осуществляли методом кислотной минерализации в соответствии с МУК 4.1.1472-03.

Качество полученных аналитических данных по всем элементам контролировали путём анализа стандартных образцов состава мышечной ткани байкальского окуня БОК-2 (ГСО 9055-2008), гомогената ткани рыб (IAEA-436, IAEA-407), мышечной ткани рыб (ERM-BB422) и «холостных» проб.

### Результаты и обсуждение

Основным критерием качества рыбы и рыбной продукции служит значение предельно допустимой концентрации (ПДК) токсичных элементов в мясе рыб. Результаты анализа отобранных образцов приведены в таблице 2.

Анализ полученных результатов показал, что концентрация практически всех перечисленных элементов в мышцах плотвы, леща, окуня, сазана, сома, судака и щуки находится в пределах ПДК. Данные о концентрации Cr, Mn, Fe, Co, Ni, Cu, Zn, представленные в таблице, достаточно хорошо согласуются с литературными источниками [9, 10, 12, 13]. Концентрация Se и I, показанная в таблице 2, практически находится в диапазоне значений, приведённых для Рыбинского водохранилища [11]: I – 0,215–0,557 мг/кг; Se – 0,101–0,340 мг/кг. Концентрация Hg в мышцах рыб в основном также находится в пределах ПДК. Исключение составляет концентрация Hg в мышцах сома: в максимуме эти значения превышают ПДК для хищных рыб. Концентрация в икре окуня Cr, Mn, Fe, Co, Ni, Cu и Zn практически соответствует концентрации этих элементов в мышцах рыбы. Элементы-токсиканты в икре окуня накапливаются разнонаправлено: так, концентрация As и Hg существенно ниже (Hg в 24 раза), чем в мышцах, а концентрация Cd в 10 раз выше, чем в мышцах рыбы.

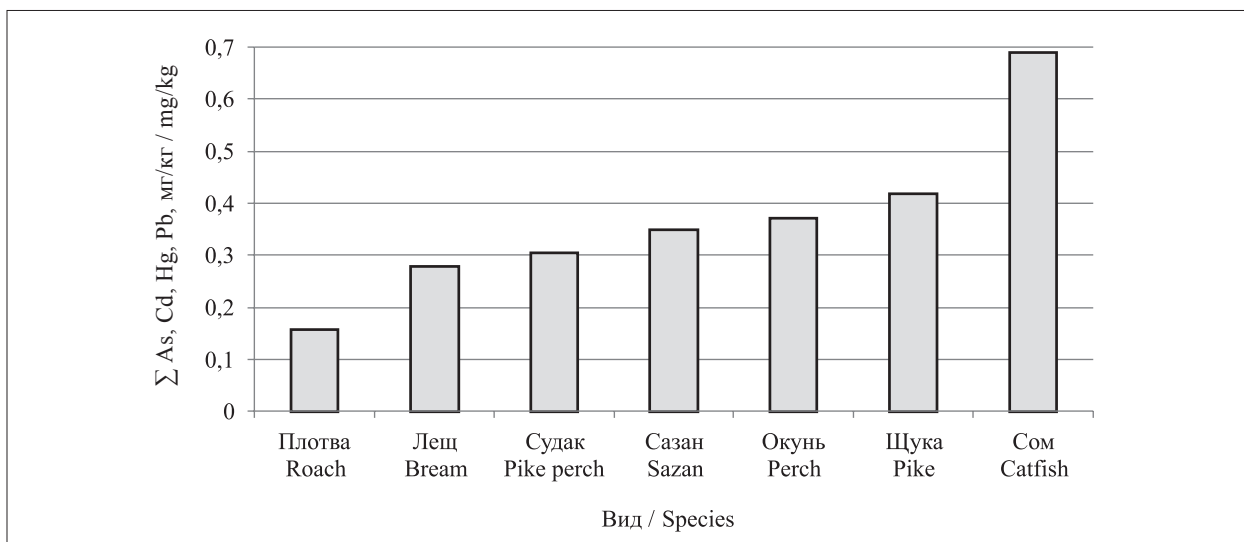
Таблица 2 / Table 2

Концентрация тяжёлых металлов и других токсичных элементов в мышцах рыб бассейна р. Волги, мг/кг  
Concentration of heavy metals and other toxic elements in the muscles of fish of the Volga river basin, mg/kg

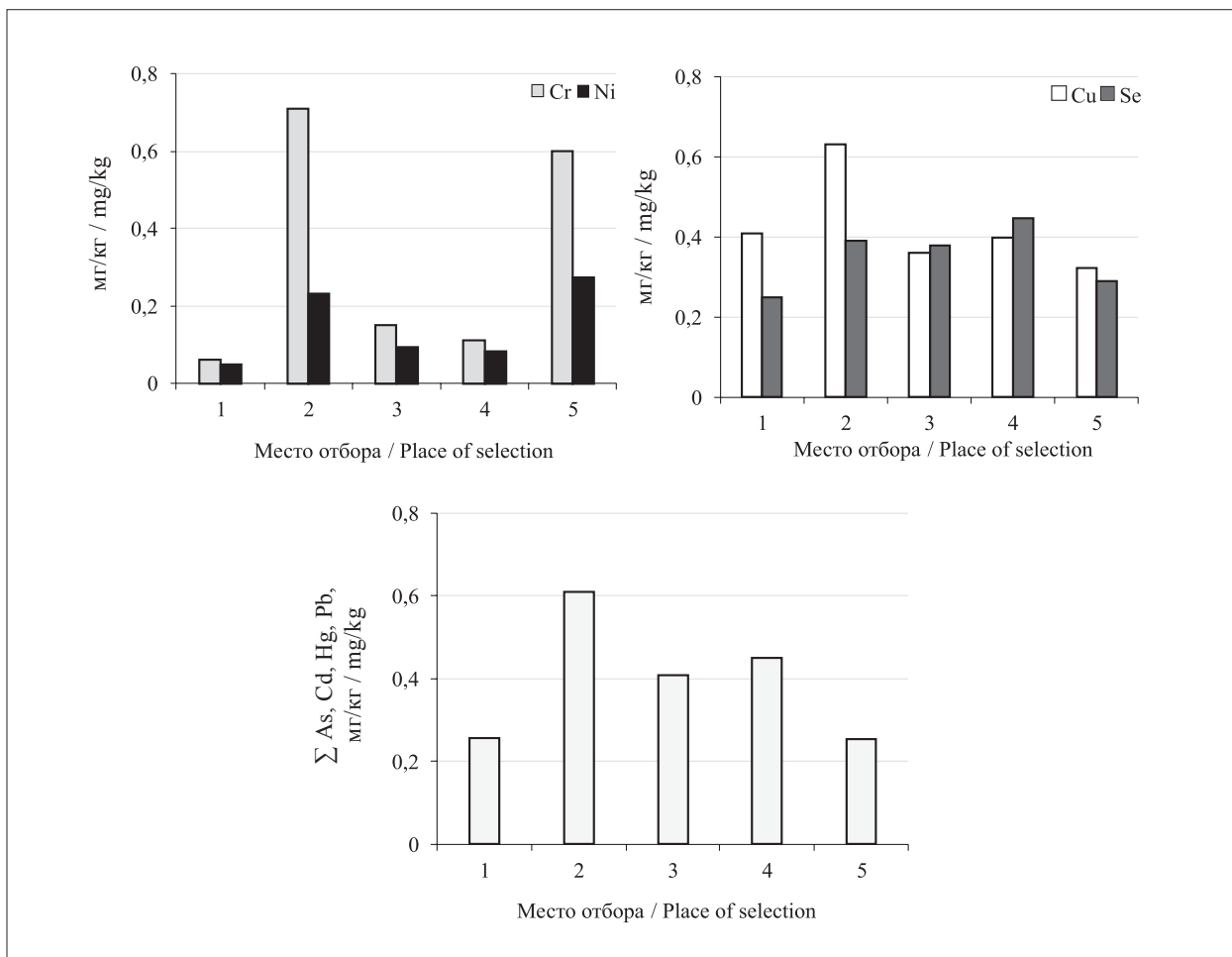
Элемент Element	Объект / Object										ПДК* MPC
	Судак <i>Sander</i>	Щука <i>Esox lucius</i>	Окунь <i>Percas fluviatilis</i>	Икра окуня <i>Perch caviar</i>	Сом <i>Silurus glanis</i>	Сазан <i>Cyprinus carpio</i>	Плотва <i>Rutilus</i>	Лещ <i>Abramis brama</i>			
Cr	0,24±0,22***	0,32±0,21	0,44±0,31	0,37±0,17	0,13±0,05	0,25±0,08	0,15±0,11	0,16±0,07	1(0,04**)		
Mn	0,75±0,32	1,5±0,9	1,03±0,97	1,7±0,7	0,26±0,12	1,4±0,8	0,34±0,15	1,3±0,7	10(2,0**)		
Fe	5,0±0,7	9,0±3,2	5,3±3,4	5,24±1,7	3,5±1,0	13±5	2,1±1,1	29±16	30(10**)		
Co	0,005±0,001	0,029±0,01	0,005±0,003	0,011±0,01	0,009±0,005	0,017±0,011	0,005±0,003	0,04±0,03	0,5(0,01**)		
Ni	0,081±0,022	0,076±0,02	0,08±0,06	0,068±0,04	0,08±0,06	0,09±0,06	0,052±0,030	0,12±0,07	0,5		
Cu	0,25±0,03	0,24±0,16	0,37±0,21	0,49±0,08	0,31±0,30	0,29±0,24	0,42±0,22	0,42±0,18	10(1,0**)		
Zn	8,52±2,3	22±10	14,3±13,7	12±7	8±5	56±12	5,5±1,3	5,5±3,8	40(12**)		
As	0,076±0,024	0,09±0,05	0,037±0,03	0,022±0,019	0,033±0,021	0,27±0,18	0,17±0,07	0,17±0,09	1,0		
Se	0,23±0,06	0,31±0,11	0,21±0,09	0,24±0,04	0,38±0,27	0,28±0,15	0,15±0,11	0,22±0,16	1(0,07**)		
Br	8,61±3,9	9,0±1,6	3,01±1,11	4,6±1,7	2,1±0,9	1,4±0,5	2,5±1,6	11±7	(3-8**)		
Sr	2,7±1,4	1,9±1,6	2,29±2,18	2,1±1,3	1,2±0,7	1,42±0,33	1,5±0,9	2,5±1,6	7		
Cd	0,004±0,002	0,003±0,002	0,003±0,001	0,032±0,020	0,005±0,003	0,006±0,004	0,006±0,004	0,006±0,005	0,2		
Sb	0,064±0,03	0,028±0,015	0,036±0,013	< 0,01	0,07±0,04	0,015±0,009	< 0,01	< 0,01	0,5		
I	0,48±0,19	0,42±0,16	0,23±0,08	< 0,1	0,53±0,24	0,37±0,24	0,21±0,12	0,31±0,18	(0,15**)		
Hg	0,12±0,07	0,26±0,09	0,19±0,06	0,008±0,005	0,52±0,31	0,25±0,18	0,09±0,04	0,21±0,11	0,4-0,6		
Pb	< 0,04	< 0,04	0,042±0,01	< 0,04	0,06±0,4	< 0,04	< 0,04	< 0,04	1		

Примечание: \* – ПДК согласно СанПиН 1.2.3685-21, СанПиН 2.3.2.1078-01; \*\* – суточная потребность, мг/сутки (MP 2.3.1.0253-21); \*\*\* – среднее значение ± стандартное отклонение.

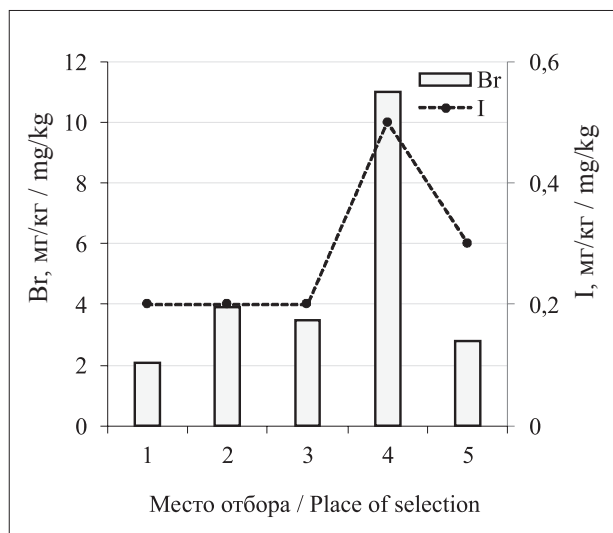
Note: \* – MPC (SanPiN 1.2.3685-21, SanPiN 2.3.2.1078-01); \*\* – daily requirement, mg/day (MR 2.3.1.0253-21); \*\*\* – mean ± standard deviation.



**Рис. 2.** Накопление суммы токсичных элементов (As, Cd, Sb, Hg, Pb) в мышцах пресноводных рыб  
**Fig. 2.** Accumulation of the total amount of toxic elements (As, Cd, Sb, Hg, Pb) in the muscles of freshwater fish



**Рис. 3.** Распределение концентрации тяжёлых и токсичных элементов в мышцах окуня в зависимости от места отбора пробы. Здесь и на рисунке 4: 1 – Кимры; 2 – Рыбинское водохранилище; 3 – Саратов (Чардым); 4 – Цаган-Аман; 5 – дельта Волги  
**Fig. 3.** Distribution of the concentration of heavy and toxic elements in perch muscles depending on the sampling location. Here and in Figure 4: 1 – Kimry; 2 – Rybinskoye reservoir; 3 – Saratov (Chardym); 4 – Tsagan-Aman; 5 – Delta of the Volga River



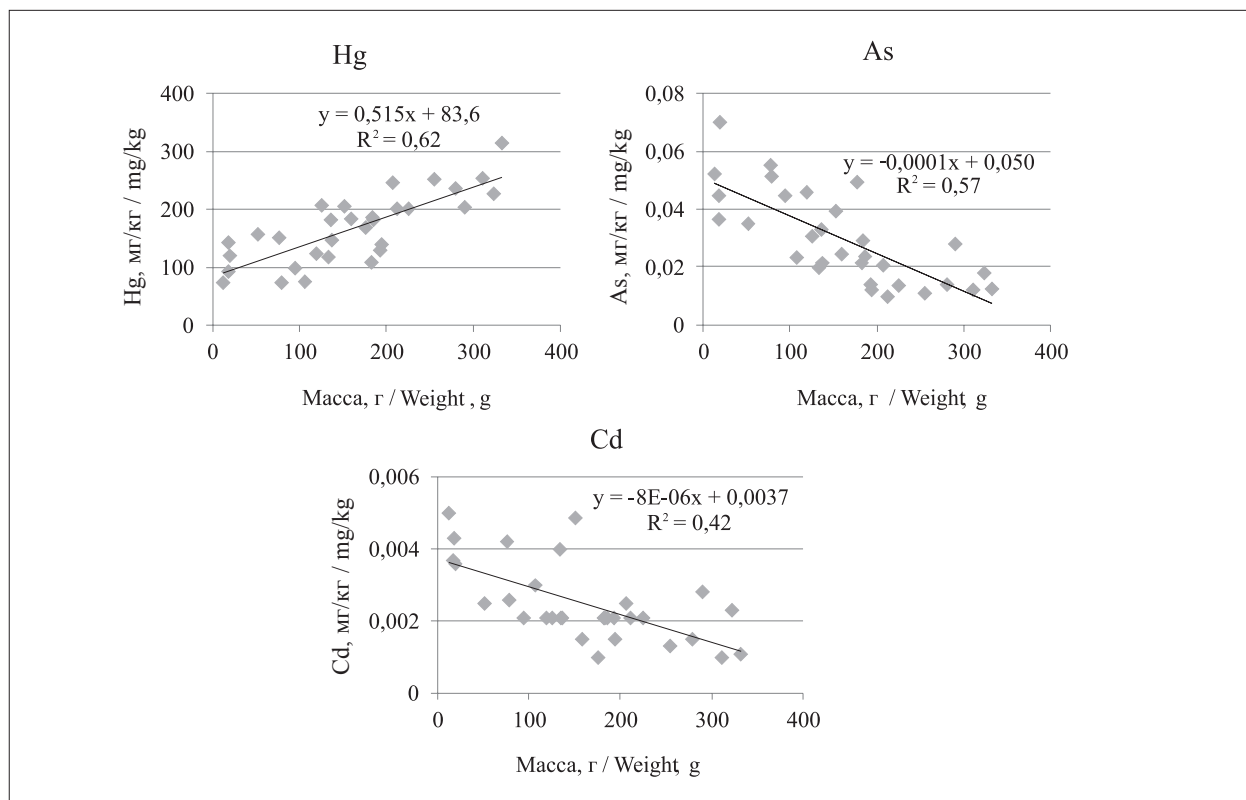
**Рис. 4.** Распределение концентрации Br и I в мышцах окуня в зависимости от места отбора пробы / **Fig. 4.** Distribution of Br and I concentrations in perch muscles depending on the sampling location

На рисунке 2 показан уровень накопления суммы токсичных элементов в мышцах различных видов пресноводных рыб. Эти графики позволяют расположить виды рыб по уровню накопления суммы токсичных элементов, а также Se и I по степени убывания в следующем по-

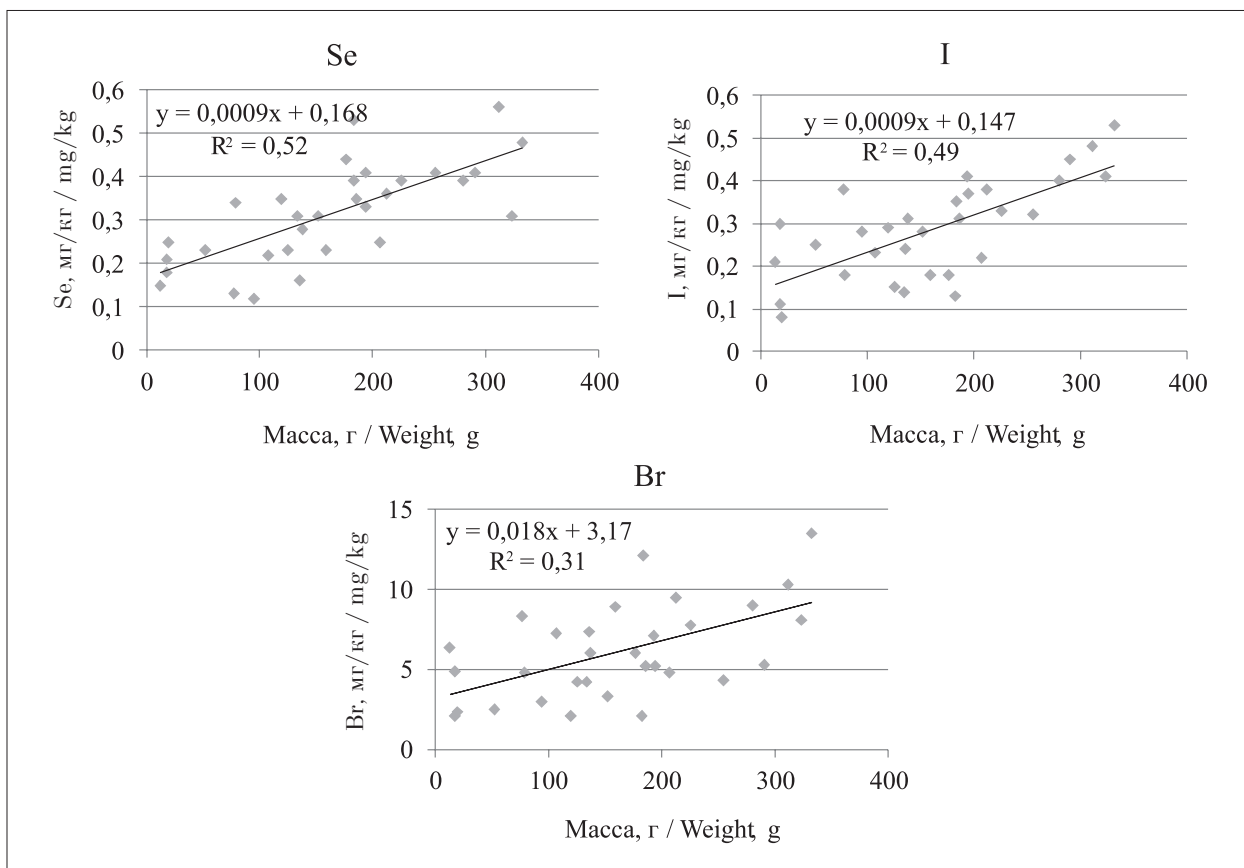
рядке: сом > щука > окунь, сазан > судак > лещ > плотва. Очевидно, что наибольший уровень накопления этих элементов характерен для типичных хищников – сома, щуки, судака, окуня.

Поскольку окунь в нашей работе имеет наиболее представительную выборку (табл. 1), была проведена оценка накопления в мышцах окуня Cr, Ni, Cu, Se, As, Sb, Hg, Pb, Br и I в зависимости от места отбора (вылова) образца. На рисунках 3 и 4 представлено распределение токсичных элементов, а также Br и I в мышцах окуня в зависимости от места вылова рыбы. Следует отметить достаточно высокие уровни накопления Cr, Ni, Cu, Se, As, Sb, Hg и Pb в мышцах окуня, выловленного на территории Рыбинского водохранилища. Минимальные уровни концентрации этих элементов характерны для Верхней Волги и района дельты Волги (Гандурино). Следует также отметить аномально высокое накопление Br и I в мышцах окуня в районе Цаган-Амана и достаточно высокий уровень накопления в этом районе As, Cd, Sb, Hg и Pb.

Из литературных источников известно, что в определённых условиях накопление токсичных элементов в мышцах рыбы носит закономерный характер. Например, описаны случаи, когда концентрации Br, I, Hg в мыш-



**Рис. 5.** Распределение Hg, As, Cd в мышцах окуня в зависимости от массы рыбы / **Fig. 5.** Distribution of Hg, As, Cd in perch muscles depending on fish weight



**Рис. 6.** Накопление Se, Br, I в мышцах окуня в зависимости от массы рыбы  
**Fig. 6.** Accumulation of Se, Br, I in perch muscles depending on fish weight

цах окуня находились в прямой зависимости от возраста или от массы рыбы [4, 5, 7]. Нами была проведена оценка накопления As, Cd, Hg, Se, Br, I в мышцах окуня в зависимости от массы рыбы.

На рисунке 5 приводится зависимость концентрации Hg, As, Cd в мышцах окуня от массы рыбы. Показано, что накопление Hg в мышцах окуня находится в прямой зависимости от массы рыбы при высокой степени достоверности аппроксимации линии тренда ( $R^2 = 0,62$ ). Расчёт коэффициента корреляции между концентрацией Hg в мышцах окуня и массой рыбы показал высокую степень зависимости данных показателей ( $R = 0,78$ ;  $p = 0,006$ ). Для остальных представленных элементов наблюдается не накопление, а уменьшение концентрации в мышцах при увеличении массы рыбы. При этом зависимость носит также прямо пропорциональный характер с низкой степенью достоверности аппроксимации линии тренда ( $R^2(As) = 0,57$ ;  $R^2(Cd) = 0,42$ ).

На рисунке 6 приведена оценка зависимости концентрации Se, Br, I в мышцах окуня от массы рыбы. График накопления Se по-

казывает наличие прямо пропорциональной зависимости при высокой степени достоверности аппроксимации линии тренда ( $R^2 = 0,52$ ), коэффициент корреляции составил  $R = 0,65$  ( $p = 0,007$ ), графики накопления I и Br также указывают на прямо пропорциональную зависимость, но с гораздо более низкой степенью достоверности аппроксимации линии тренда.

Учитывая всё сказанное выше, можно предположить, что концентрация любого элемента в тканях рыбы – это баланс между скоростью поступления данного элемента в организм рыбы и скоростью прироста массы тела рыбы. Очевидно, что при высокой скорости наращивания массы рыбы и низкой скорости поступления элемента, концентрация элемента в зависимости от массы будет падать и, наоборот, при низкой скорости роста и высокой скорости поступления элемента концентрация будет возрастать.

### Заключение

Полученные в ходе работы данные показали, что превышения ПДК тяжёлых метал-

лов и других токсичных элементов для всех исследованных видов рыб не обнаружено. Наибольшее значение концентрации токсичных элементов отмечаются для Рыбинского водохранилища и зоны Цаган-Амана, минимальные значения характерны для верхней Волги и дельты.

Накопление элементов в мышцах различных видов рыб носит дифференцированный характер: наибольший уровень накопления токсичных элементов характерен для сома, судака и щуки. Концентрации Hg и Se в мышцах окуня находятся в прямо пропорциональной зависимости от массы рыбы.

### Литература

1. Akila M., Anbalagan S., Lakshmisri N.M., Janaki V., Ramesh T., Merlin J.R., Kamala-Kannan S. Heavy metal accumulation in selected fish species from Pulicat Lake, India, and health risk assessment // *Environmental Technology & Innovation*. 2022. V. 27. Article No. 102744.

2. Melake B.A., Nkuba B., Groffen T., De Boeck G., Bervoets L. Distribution of metals in water, sediment and fish tissue. Consequences for human health risks due to fish consumption in Lake Hawassa, Ethiopia // *Science of the Total Environment*. 2022. V. 843. Article No. 156968.

3. Ai L., Ma B., Shao S., Zhang L. Heavy metals in Chinese freshwater fish: Levels, regional distribution, sources and health risk assessment // *Science of the Total Environment*. 2022. V. 853. Article No. 158455.

4. Комов В.Т., Степанова И.К., Гремячих В.А. Содержание ртути в мышцах рыб из водоёмов Северо-Запада России: причины интенсивного накопления и оценка негативного эффекта на состояние здоровья людей // *Актуальные проблемы водной токсикологии*. Борок: Институт биологии внутренних вод РАН, 2004. С. 99–123.

5. Немова Н.Н. Биохимические эффекты накопления ртути у рыб. М.: Наука, 2005. 161 с.

6. Пономаренко А.М. Эколого-рыбохозяйственные аспекты ртутного загрязнения водохранилищ: Диссертация на соискание учёной степени кандидата биологических наук. Казань, 2006. 116 с.

7. Горбунов А.В., Ляпунов С.М., Окина О.И., Шешуков В.С. Оценка поступления малых доз ртути в организм человека с пищей // *Экология человека*. 2017. № 10. С. 16–20.

8. Моисеенко Т.И., Гашкина Н.А. Биоаккумуляция ртути в рыбе как индикатор загрязнения воды // *Geochemistry International*. 2016. V. 54. P. 485–493.

9. Лопарева Т.Я., Шарипова О.А., Петрушенко Л.В. Уровень накопления токсикантов в мышечной ткани рыб в водных бассейнах Республики Казахстан // *Вестник Астраханского государственного технического университета*. Серия: Рыбное хозяйство. 2016. № 2. С. 115–122.

10. Махлун А.В., Ильясова Г.Х., Мусаев М.А., Вундцеттель М.Ф. Сравнительный анализ микроэлементного состава некоторых компонентов водных экосистем дельты Волги // *Физиология и биохимия гидробионтов*. Серия: Рыбное хозяйство. 2012. № 1. С. 149–153.

11. Кекина Е.Г., Голубкина Н.А., Кузьмина В.В., Баранов В.И., Хотимченко С.А. Содержание йода и селена в мышцах некоторых промысловых видов рыб Рыбинского водохранилища // *Микроэлементы в медицине*. 2009. Т. 10. № 3–4. С. 31–36.

12. Гилева Т.А., Костицына Н.В. Характеристика периферической крови и содержание тяжёлых металлов в органах и тканях окуня в водоёмах бассейна реки Кама // *Теоретическая и прикладная экология*. 2014. № 2. С. 46–51.

13. Ciesielski T., Pastukhov M.V., Fodor P., Bertenyi Z., Namiesnik J., Szefer P. Relationships and bioaccumulation of chemical elements in Baikal seal (*Phoca sibirica*) // *Environmental Pollution*. 2006. V. 139. No. 2. P. 372–384.

14. Черная Л.В., Ковальчук Л.А., Микшевич Н.В. Особенности биоаккумуляции тяжёлых и токсичных металлов в тканях большой ложноконской пиявки *Haemopis sanguisuga* L. в водных экосистемах Урала // *Теоретическая и прикладная экология*. 2022. № 3. С. 68–74.

15. Гершонков А.М., Меркулова Е.Ю. Анализ потребления основных продуктов питания по регионам Российской Федерации // *Социально-экономические явления и процессы*. 2014. Т. 9. № 11. С. 54–63.

16. Гузенко М.А. Состояние и тенденции развития продовольственной безопасности в Волгоградской области // *Terra Economicus*. 2011. Т. 9. № 1. Часть 2. С. 134–138.

17. Гуркина О.А., Тугулева Г.В. Исследование рынка рыбы и рыбопродуктов в Саратове // *Современные технологии в сельскохозяйственной науке и производстве: Сборник докладов Международной научно-практической конференции*. Саратов: ФГБНУ «НИИСХ Юго-Востока», 2016. С. 452–456.

### References

1. Akila M., Anbalagan S., Lakshmisri N.M., Janaki V., Ramesh T., Merlin J.R., Kamala-Kannan S. Heavy metal accumulation in selected fish species from Pulicat Lake, India, and health risk assessment // *Environmental Technology & Innovation*. 2022. V. 27. Article No. 102744. doi: 10.1016/j.eti.2022.102744

2. Melake B.A., Nkuba B., Groffen T., De Boeck G., Bervoets L. Distribution of metals in water, sediment and fish tissue. Consequences for human health risks due to fish consumption in Lake Hawassa, Ethiopia // *Science of the Total Environment*. 2022. V. 843. Article No. 156968. doi: 10.1016/j.scitotenv.2022.156968

3. Ai L., Ma B., Shao S., Zhang L. Heavy metals in Chinese freshwater fish: Levels, regional distribution,

sources and health risk assessment // Science of the Total Environment. 2022. V. 853. Article No. 158455. doi: 10.1016/j.scitotenv.2022.158455

4. Komov V.T., Stepanova I.K., Gremyachikh V.A. Mercury content in the muscles of fish from the reservoirs of the North-West of Russia: reasons for intensive accumulation and assessment of the negative effect on human health // Actual problems of aquatic toxicology. Borok: Institut biologii vnutrennikh vod RAN, 2004. P. 99–123 (in Russian).

5. Nemova N.N. Biochemical effects of mercury accumulation in fish. Moskva: Nauka, 2005. 161 p. (in Russian).

6. Ponomarenko A.M. Ecological and fishery aspects of mercury pollution of reservoirs: Dissertation for the degree of candidate of biological sciences. Kazan, 2006. 116 p. (in Russian).

7. Gorbunov A.V., Lyapunov S.M., Okina O.I., Sheshukov V.S. Assessment of the intake of small doses of mercury into the human body with food // Human Ecology. 2017. No. 10. P. 16–20 (in Russian). doi: 10.33396/1728-0869-2017-10-16-20

8. Moiseenko T.I., Gashkina N.A. Bioaccumulation of mercury in fish as indicator of water pollution // Geochemistry International. 2016. V. 54. P. 485–493. doi: 10.1134/S0016702916060045

9. Lopareva T.Ya., Sharipova O.A., Petrushenko L.V. The level of accumulation of toxicants in the muscle tissue of fish in the water basins of the Republic of Kazakhstan // Vestnik Astrakhanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Seriya: Rybnoe khozyaystvo. 2016. No. 2. P. 115–122 (in Russian).

10. Makhlyn A.V., Pyasova G.H., Musaev M.A., Wundzettel M.F. Comparative analysis of the trace element composition of some components of aquatic ecosystems of the Volga Delta // Fiziologiya i biokhimiya gidrobiontov. Seriya: Rybnoe khozyaystvo. 2012. No. 1. P. 149–153 (in Russian).

11. Kekina E.G., Golubkina N.A., Kuz'mina V.V., Baranov V.I., Khotimchenko S.A. The content of iodine and selenium in the muscles of some commercial fish species of the Rybinsk reservoir // Microelements in Medicine. 2009. V. 10. No. 3–4. P. 31–36 (in Russian).

12. Gileva T.A., Kostitsyna N.V. Characteristics of peripheral blood and the content of heavy metals in the organs and tissues of perch in water bodies of the Kama River basin // Theoretical and Applied Ecology. 2014. No. 2. P. 46–51 (in Russian). doi: 10.25750/1995-4301-2014-2-046-051

13. Ciesielski T., Pastukhov M.V., Fodor P., Bertenyi Z., Namiesnik J., Szefer P. Relationships and bioaccumulation of chemical elements in Baikal seal (*Phoca sibirica*) // Environmental Pollution. 2006. V. 139. No. 2. P. 372–384 (in Russian). doi: 10.1016/j.envpol.2004.12.040

14. Chernaya L.V., Kovalchuk L.A., Mikshevich N.V. Features of bioaccumulation of heavy and toxic metals in the tissues of the great False Dragon leech *Haemopsis sanguisuga* L. in the aquatic ecosystems of the Urals // Theoretical and Applied Ecology. 2022. No. 3. P. 68–74 (in Russian). doi: 10.25750/1995-4301-2022-3-068-074

15. Gershonkov A.M., Merkulova E.Yu. Analysis of the consumption of basic food products by regions of the Russian Federation // Socio-economic Phenomena and Processes. 2014. V. 9. No. 11. P. 54–63 (in Russian).

16. Guzenko M.A. State and trends in the development of food security in the Volgograd region // Terra Economicus. 2011. V. 9. No. 1. Part 2. P. 134–138 (in Russian).

17. Gurkina O.A., Tuguleva G.V. Market research of fish and fish products in Saratov // Modern technologies in agricultural science and production: Sbornik dokladov Mezhdunarodnoy nauchno- prakticheskoy konferentsii, 2016. P. 452–456 (in Russian).

## Гальваношламы – источник вторичных материальных ресурсов при получении пигментов-наполнителей для лакокрасочных изделий

© 2023. Л. Н. Ольшанская<sup>1</sup>, д. х. н., профессор,  
Е. Н. Лазарева<sup>1</sup>, к. х. н., доцент, Е. А. Татаринцева<sup>1,2</sup>, к. т. н., доцент,  
О. А. Арефьева<sup>1</sup>, к. б. н., доцент, Е. В. Яковлева<sup>1</sup>, к. х. н., доцент,  
З. А. Симонова<sup>1</sup>, к. б. н., доцент,

<sup>1</sup>Саратовский государственный технический университет  
имени Гагарина Ю. А.,  
440054, Россия, г. Саратов, ул. Политехническая, д. 77,

<sup>2</sup>Тольяттинский государственный университет,  
445020, Россия, г. Тольятти, ул. Белорусская, д. 14,  
e-mail: ecos123@mail.ru, ms.elena.lazareva@list.ru, tatarinceva-elen@mail.ru

Гальванические производства по степени отрицательного воздействия на окружающую среду занимают одно из первых мест вследствие содержания ионов тяжёлых металлов, обладающих токсичными, канцерогенными и мутагенными свойствами. Нахождение эффективного способа переработки и утилизации гальваношламов позволит решить проблему неуклонного роста стоимости металлов и минимизировать отрицательное воздействие на окружающую среду, что является важной природоохранной задачей, имеющей большую научную и практическую значимость. В работе представлены результаты исследований по извлечению из железосодержащего гальваношлама оксида железа (III)  $Fe_2O_3$  для использования его в качестве пигмента-наполнителя при изготовлении краски железный сурик. Исходный гальваношлам растворяли в воде до сметанообразной консистенции и затем постепенно добавляли серную кислоту до понижения величины pH (pH 6,0–1,5), получали сульфаты металлов. Гидроксид железа (III)  $Fe(OH)_3$  осаждали из отфильтрованных сульфатных растворов 40% раствором щелочи NaOH при pH 1,5–4,1. После предварительной сушки при температуре  $\approx 150$  °C проводили его термообработку при  $600 \pm 2$  °C в течение 5–6 ч и получали оксид железа (III)  $Fe_2O_3$ , который соответствовал требованиям ГОСТ 10503-71 «Краски масляные, готовые к применению. Технические условия» по размеру частиц, маслоёмкости, плотности частиц и pH водных вытяжек. Изготовленная на его основе краска железный сурик также отвечала требованиям этого ГОСТ по таким параметрам, как вязкость, укрывистость, время высыхания и др. Предложена принципиальная схема для получения пигмента-наполнителя, применяемого для производства лакокрасочных изделий. В схеме использован набор и компоновка широко применяемого в промышленности оборудования (транспортёр, дозаторы, шнек-питатели, ванны кислотной и щелочной обработки, центрифуга, печь сушки и обжига).

**Ключевые слова:** гальваношлам, гидроксид железа, утилизация, пигменты-наполнители, оксид железа (III), лакокрасочные изделия, схема получения оксида железа (III).

## Galvanic sludge is a source of secondary material resources in the production of filler pigments for paints and varnishes

© 2023. L. N. Olshanskaya<sup>1</sup> ORCID: 0000-0002-8449-9368<sup>†</sup>  
E. N. Lazareva<sup>1</sup> ORCID: 0000-0001-7867-9576<sup>†</sup>, E. A. Tatarintseva<sup>1,2</sup> ORCID: 0000-0002-5925-3227<sup>†</sup>  
O. A. Aref'eva<sup>1</sup> ORCID: 0000-0002-2835-8595<sup>†</sup>, E. V. Yakovleva<sup>1</sup> ORCID: 0000-0002-8489-9804<sup>†</sup>  
Z. A. Simonova<sup>1</sup> ORCID: 0000-0002-2353-1547<sup>†</sup>

<sup>1</sup>Yuri Gagarin State Technical University of Saratov,  
77, Politekhnikeskaya St., Saratov, Russia, 440054,

<sup>2</sup>Togliatti State University,  
14, Belorusskaya St., Togliatti, Russia, 445020,  
e-mail: ecos123@mail.ru, ms.elena.lazareva@list.ru, tatarinceva-elen@mail.ru

Galvanic production occupies one of the first places according to the degree of negative impact on the environment due to the content of heavy metal ions which have toxic, carcinogenic and mutagenic properties. Finding an effective method of recycling and utilization of galvanic sludge will solve the problem of the steady growth of the cost of metals



and minimize the negative impact on the environment, which is an important environmental task of great scientific and practical significance. This paper presents the results of studies on the extraction of iron oxide(III)  $Fe_2O_3$  from iron-containing galvanic sludge to use it as a filler pigment in the manufacture of paint (red iron oxide). At the initial stage, the original galvanic sludge was dissolved in distilled water to a creamy consistency, and then, sulfuric acid was gradually added until the pH value gradually decreased (pH 6.0–1.5), metal sulfates were obtained. Iron hydroxide(III)  $Fe(OH)_3$  was precipitated from filtered sulfate solutions with 40% NaOH alkali solution at pH 1.5–4.1. After preliminary drying at a temperature of  $\approx 150^\circ C$ , heat treatment was carried out at  $600 \pm 2^\circ C$  for 5–6 h, obtaining iron oxide(III)  $Fe_2O_3$  which met the requirements of GOST 10503-71 “Oil paints, ready to use. Technical Conditions in terms of particle size, oil capacity, particle density and pH of aqueous extracts. The iron minium paint made on its basis also met the requirements of this GOST on parameters: viscosity, hiding power, drying time, etc. A schematic diagram is proposed for obtaining a filler pigment used for the production of paints and varnishes. The scheme uses a set and layout of equipment widely used in industry (conveyor, batchers, screw feeders, acid and alkali treatment baths, centrifuge, drying and roasting oven).

**Keywords:** galvanic sludge, iron hydroxide, utilization, filler pigments, iron oxide, paint and varnish products, iron oxide(III), scheme for obtaining iron oxide(III).

Возрастающая антропогенная нагрузка на окружающую среду (ОС) угрожает здоровью настоящего и будущих поколений, в связи с чем на первый план выходят проблемы разработки и внедрения малоотходных технологий, процессов утилизации отходов, получения и использования экологически более безопасных продуктов. К токсичным промышленным отходам относятся гальваношламы, образующиеся в гальванических цехах производств. Это суспензии соединений тяжёлых металлов, оказывающих вредное воздействие на ОС и организм человека, являясь мощными стимуляторами и возбудителями раковых и сердечно-сосудистых заболеваний. Учитывая, что загрязнение этими веществами происходит по всей биосфере [1–4], их необходимо утилизировать при одновременном обезвреживании тяжёлых металлов [5–10], что является важной задачей, так как избежать образования гальваноотходов не удастся и в будущем. В России постоянно увеличивается количество твёрдых промышленных и коммунальных отходов (ТПКО), которые свозятся на свалки или полигоны. Из них в лучшем случае подлежат переработке и последующей утилизации 3–5% [4].

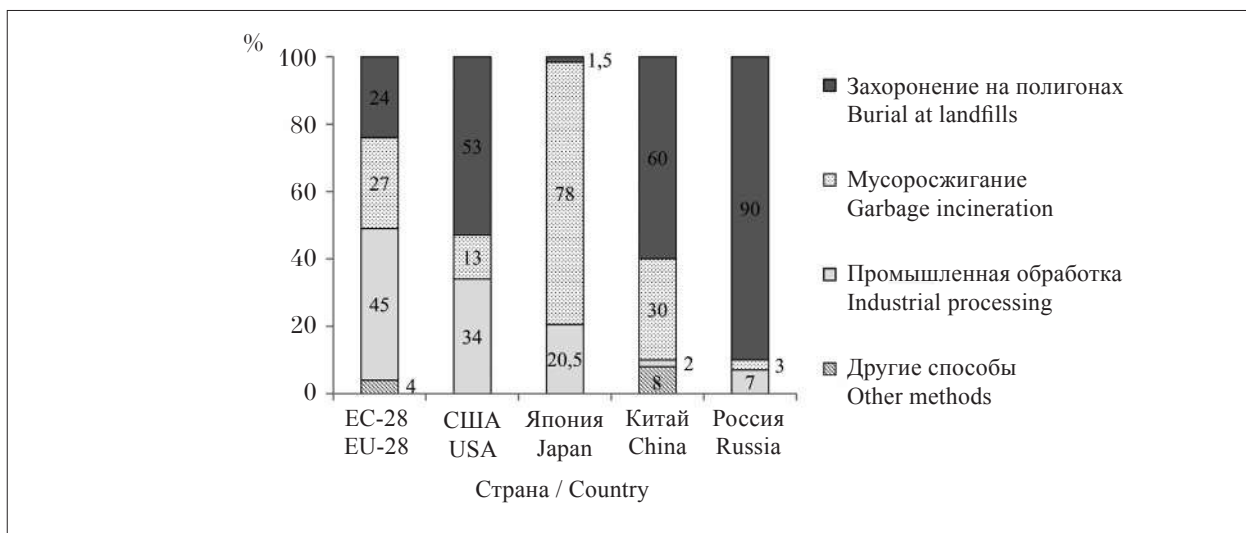
По сравнению с Японией и рядом западных стран в СССР и России большинство ТПКО (около 97%) свозилось на свалки и на необустроенные в соответствии с требованиями полигоны, из которых 88% находились в «неудовлетворительном санитарном состоянии» [4, 9–12] (рис. 1). Эти отходы представляют нестабильную неконтролируемую смесь строительного мусора, пластмассы, металлов, бумаги, пищевых отходов, резины, стекла и др. Вместе с тем доказано, что это богатый источник вторичных материальных ресурсов, в том числе чёрных, цветных, редких и рассеянных металлов, а также бесплатный энергоноситель [10, 12].

До сих пор сортировка отходов в России практически не проводится. Это во многом обусловлено следующими факторами [5]: дефицитом потребительских услуг и товаров; различиями в культуре потребления, которые приводили к меньшим, чем в других странах объёмам отходов на одного человека.

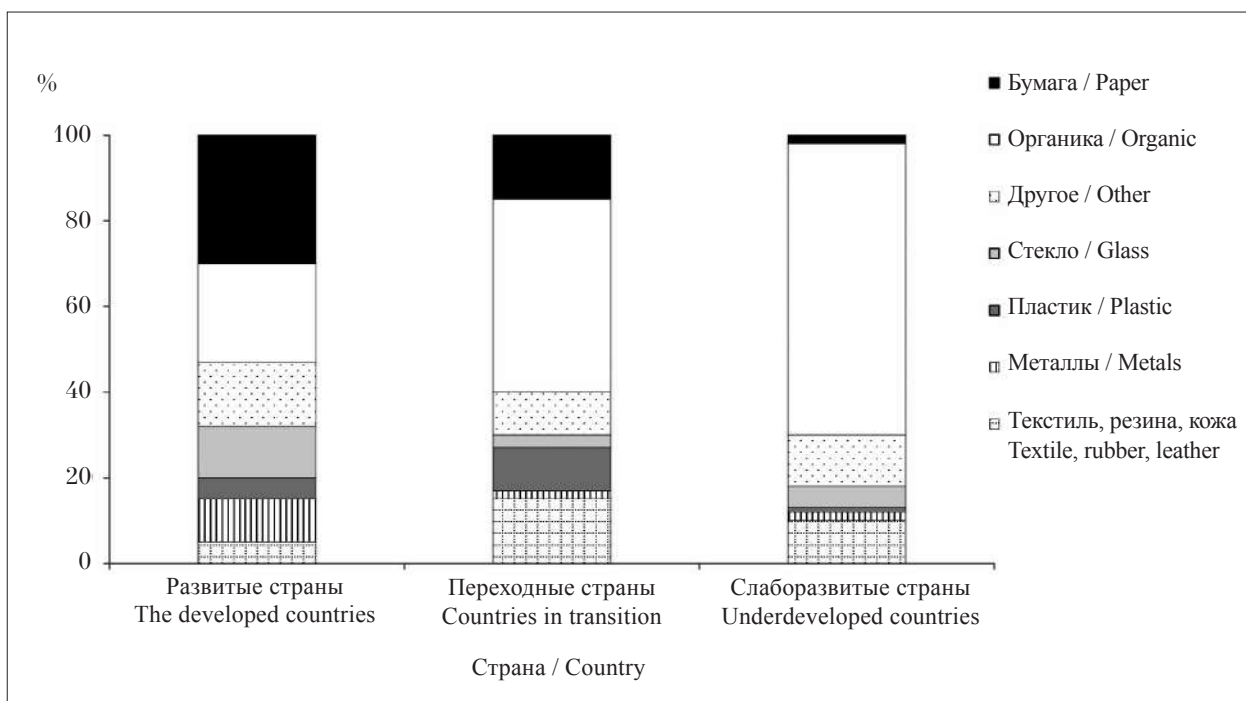
В то же время в России производятся, импортируются и потребляются сложные продукты развитых промышленных стран, то есть состав и количество отходов всё более приближаются к западным, что приводит к резкому росту количества и разнообразию ТПКО, объём и состав которых чрезвычайно разнообразны (рис. 2) [5].

Большое количество составляют органические (пищевые) отходы – 40%; макулатура около 35%; на металл, стекло и пластик приходится 9–11%; на дерево, текстиль, резину – 4%. Зарубежный опыт показывает, что рациональная организация переработки отходов даёт возможность использования до 90% продуктов переработки и утилизации. Технологические рекомендации по наиболее рациональному использованию отходов разрабатываются, исходя из их химического состава. Например, шлаки цветной металлургии содержат до 40% железа и других ценных металлов; в гальваношламах находятся соединения никеля, железа, цинка, меди, хрома и др.

В настоящее время для России актуальными являются проблемы экологизации производств, переход к малоотходным, а в перспективе – к безотходным технологиям. Разрабатывается научно обоснованная концепция комплексного использования различных видов отходов, чтобы уже на стадии проектирования, строительства и реконструкции промышленных предприятий применять технические решения по недопущению образования твёрдых промышленных отходов и необходимости их утилизации. Это позволит



**Рис. 1.** Направления утилизации ТПКО по странам мира (в % к общему количеству ТПКО) [4]  
**Fig. 1.** The main directions of waste disposal in the countries of the world (in % to the total amount of solid waste) [4]



**Рис. 2.** Распределение ТПКО по категориям в различных странах (в %) [5]  
**Fig. 2.** Distribution of solid industrial and municipal waste by categories in various countries (in %) [5]

экономить материалы на каждом цикле производства, минимизировать экологический ущерб ОС при одновременной реализации более низких капитальных затрат и получении прибыли.

Целью настоящей работы является разработка технологии переработки и утилизации железосодержащих отходов с целью извлечения оксида железа  $Fe_2O_3$  и использования его в качестве пигмента-наполнителя при изготовлении масляной краски (железный сурик).

### Объекты и методы исследования

Объектами исследования служили отходы линий травления и активации предприятия ОАО «Роберт-Бош-Саратов». Анализы состава гальваношлама показали наличие в его составе в наибольшем процентном соотношении  $Ni \approx 65\%$  и  $Fe \approx 30\%$ , и в незначительных количествах: Mn, Cu, Zn, S, Cl, Cr и др. (рис. 3).

Исходный гальваношлам имел консистенцию сухого пластилина, поэтому перед

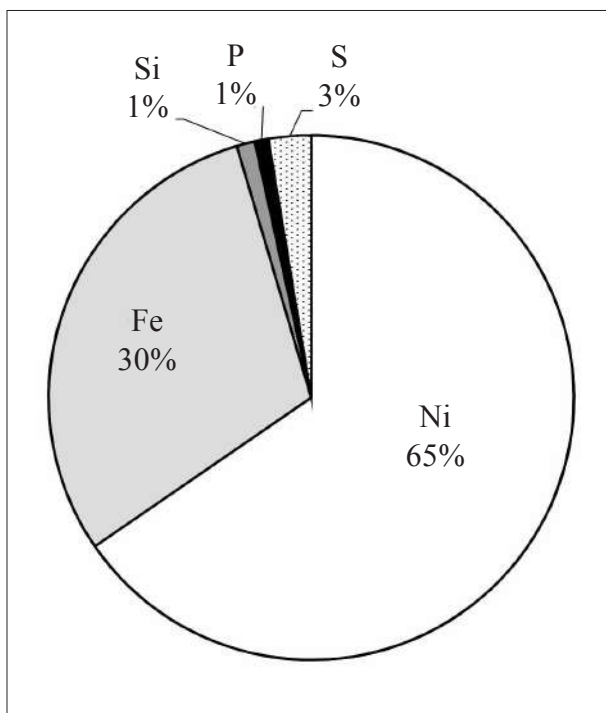


Рис. 3. Состав гальваншлама ОАО «Роберт-Босх-Саратов»  
 Fig. 3. The composition of the original galvanic sludge of JSC “Robert-Bosch-Saratov”

обработкой его предварительно растворяли в дистиллированной воде до суспензии текучей сметанообразной консистенции и проводили кислотно-щелочную обработку. Для этого к суспензии приливали малыми дозами концентрированную серную кислоту при тщательном перемешивании и охлаждении до постепенного понижения величины рН (рН 6,0–1,5), при которой достигалось наиболее высокое растворение компонентов гальваншлама и их переход в сульфаты металлов. Полученный раствор отфильтровывали от глинисто-песочного осадка и использовали для выделения гидроксида железа Fe(OH)<sub>3</sub> при щелочной обработке сульфатных растворов 40%-ным раствором щёлочи NaOH в соответствии с последовательным рядом осаждения гидроксидов металлов [13] (табл. 1).

При извлечении Fe(OH)<sub>3</sub> в раствор постепенно добавляли щёлочь в интервале рН

1,5–4,1 и затем отделяли и отфильтровывали кристаллы гидроксида железа (III). Высушенный при 150 °С порошок Fe(OH)<sub>3</sub> измельчали и прокаливали в муфельной печи ЭКСП-10 при температуре t = 600±2 °С в течение 5–6 ч. При этом был получен оксид Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, который исследовали согласно ГОСТ 10503-71 «Краски масляные, готовые к применению. Технические условия» на размер частиц, маслоёмкость, плотность частиц, рН водных вытяжек (табл. 2) и применимость в качестве пигмента-наполнителя для изготовления масляной краски (железный сурик).

Результаты и обсуждение

Полученный порошок оксида железа имел желтовато-коричневый цвет. По данным седиментационного анализа размер частиц составил 10–40 мкм, при котором не требуется предварительный помол. Более 60% частиц составляли непористые структуры размером 5–30 мкм. Это указывает на их низкую маслоёмкость и служит важной характеристикой пигментов-наполнителей. Результаты испытаний показали соответствие свойств оксида Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> характеристикам традиционно используемых в промышленности пигментов-наполнителей (каолин, мел, слюда и др.).

В соответствии с требованиями ГОСТ 10503-71 готовили краску железный сурик и определяли содержащиеся в ней летучие и нелетучие компоненты, устанавливали вязкость, укрывистость, время высыхания и другие показатели (табл. 3). Установлено, что полученная краска соответствует требованиям ГОСТ 10503-71.

Нами предложена принципиальная технологическая схема производства пигмента-наполнителя на основе оксида Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (рис. 4). В схеме использован набор и компоновка широко применяемого в промышленности оборудования (транспортёр, дозаторы, шнеки-питатели, ванны кислотной и щелочной обработки, центрифуга, печь сушки и обжига).

Проведённая эколого-экономическая оценка показала, что при производстве краски

Таблица 1 / Table 1

Ряд осаждения гидроксидов металлов из кислого раствора [13]  
 A series of precipitation of metal hydroxides from an acidic solution [13]

Ион / Ion	Fe(III)	Cr(III)	Cu(II)	Zn	Fe(II)	Ni(II)	Mn(II)	Mg
рН	1,5*-4,1**	4,0-6,8	5,3-6,2	5,4-8,0	6,5-9,7	7,2-9,5	7,8-10,4	9,4-12,4

Примечание\* – первая цифра – начало осаждения; \*\* – вторая цифра – полное осаждение гидроксида.  
 Note: \* – the first digit is the beginning of precipitation; \*\* – second digit is the complete precipitation of hydroxide.

Таблица 2 / Table 2

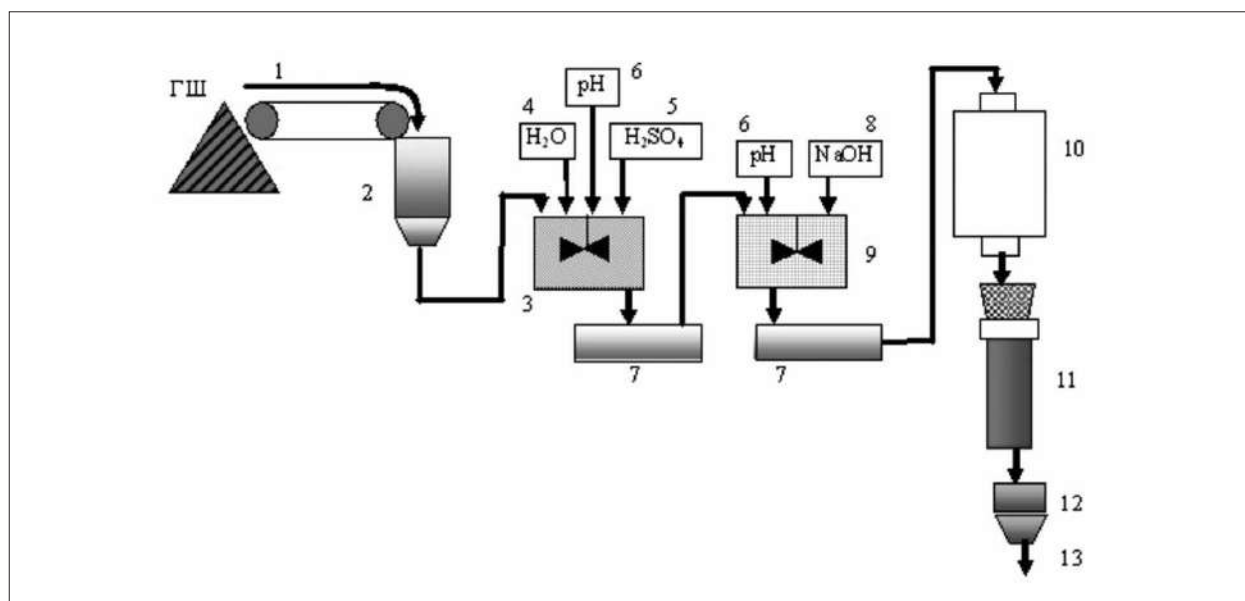
Свойства пигментов-наполнителей / Properties of filler pigments

Наполнитель Filler	Кажущаяся плотность, г/см <sup>3</sup> Apparent density, g/cm <sup>3</sup>	Маслоёмкость, см <sup>3</sup> /100 г Oil absorption, cm <sup>3</sup> /100 g	pH вытяжки Extract pH
Каолин Kaolin	2,54–2,60	13–20	5–8
Мел Chalk	2,69–2,72	11–16	9–10
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	4,81–4,89	22–24	7–9

Таблица 3 / Table 3

Соответствие характеристик железного сурика требованиям ГОСТ 10503-71  
Compliance of paint characteristics (iron minium) with the requirements of GOST 10503-71

Характеристики Characteristics	Содержание веществ, % Substance content, %		Условная вязкость, с Conditional viscosity, s	Степень перетира, мкм Degree of grinding, microns	Укрывистость, г/м <sup>2</sup> Hiding power, g/m <sup>2</sup>	Время высыхания, ч Drying out time, h	Относительная твёрдость Relative hardness
	летучих volatile	нелетучих non-volatile					
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	11,4	88,6	69,6	38	109,7	23,3	0,074
ГОСТ 10503-71 GOST 10503-71	< 20	≥ 60,0	65–140	≤ 70	≤ 170	24,0	≥ 0,05



**Рис. 4.** Технологическая схема получения пигмента-наполнителя Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>:  
1 – транспортёр; 2 – дозатор; 3 – ванна кислотной обработки; 4 – дозатор воды;  
5 – дозатор кислоты; 6 – pH-метры; 7 – шнеки-питатели; 8 – дозатор щёлочи;  
9 – ванна щелочной обработки; 10 – центрифуга; 11 – печь обжига;  
12 – бункер готовой продукции; 13 – на фасовку

**Fig. 4.** Technological scheme for obtaining a pigment-filler based on Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>:  
1 – conveyor; 2 – dispenser; 3 – acid treatment bath; 4 – water dispenser;  
5 – acid dispenser; 6 – pH meters; 7 – augers-feeders; 8 – alkali dispenser;  
9 – alkaline treatment bath; 10 – centrifuge; 11 – kiln;  
12 – bunker of finished products; 13 – for packaging

можно получить экономическую (расширение производства, увеличение ассортимента продукции, количества рабочих мест, прибыль и др.) и экологическую выгоду (уменьшение площадей для организации полигонов и свалок, снижение отрицательного влияния отходов гальваношламов на ОС и здоровье населения).

### Заключение

Проведённые исследования показали, что из железосодержащих гальваношламов можно получать качественные пигменты-наполнители для производства краски железный сурик.

Экспериментальные исследования позволили установить режимы извлечения  $\text{Fe}(\text{OH})_3$ : осаждение осуществляли в интервале pH 1,5–4,1, далее проводили сушку полученного материала при  $\approx 150^\circ\text{C}$ .

Путём последующей термообработки при  $600\pm 2^\circ\text{C}$  в течение 5–6 ч получили оксид железа (III), который был использован в качестве пигмента-наполнителя. Определены основные характеристики пигмента-наполнителя, который использовали при изготовлении краски железный сурик: дисперсность частиц – 10–20 мкм; маслоёмкость – 22–24  $\text{cm}^3/100\text{ г}$ ; кажущаяся плотность – 4,81–4,89  $\text{г/см}^3$ ; pH вытяжки – 7–9.

Для железного сурика относительная твёрдость покрытий составила 0,074; укрывистость – 109,7  $\text{г/м}^2$ ; время высыхания краски – 23,3 ч; содержание летучих веществ – 11,4%; условная вязкость – 69,6 с; степень перетира – 38 мкм. Установлено соответствие требованиям ГОСТ 10503-71 на получение лакокрасочных покрытий.

Предложена принципиальная технологическая схема для извлечения оксида железа (III) из отходов гальванических производств, в которой использован набор и компоновка широко применяемого в промышленности оборудования (транспортёр, дозаторы, шнеки-питатели, ванны кислотной и щелочной обработки, центрифуга, печь сушки и обжига).

### Литература

1. Леонтьев Л.И., Юсфин Ю.С., Черноусов П.И. Отходы: воздействие на окружающую среду и пути утилизации // Экология и промышленность России. 2003. № 3. С. 32–35.
2. Другов Ю.С., Родин А.А. Анализ загрязнённой почвы и опасных отходов. М.: Изд-во Бином. Лаборатория знаний, 2007. 424 с.

3. Родионов А.И., Клушин В.Н., Систер В.Г. Технологические процессы экологической безопасности (Основы энвайронменталистики). М.: Высшая школа, 2008. 801 с.

4. Когда Россия сможет перерабатывать мусор как в Европе? [Электронный ресурс] <https://www.factograph.info/a/29011375.html> (Дата обращения: 31.07.2022).

5. Гринин А.С., Новиков В.Н. Промышленные и бытовые отходы: хранение, утилизация, переработка. М.: ФАИР-ПРЕСС, 2002. 332 с.

6. Сырчина Н.В., Ашихмина Т.Я., Кантор Г.Я. Получение неорганических пигментов из отходов гальванических производств // Теоретическая и прикладная экология. 2021. № 1. С. 22–29.

7. Баркан М.Ш., Федосеев И.В., Логинова А.Ю. Технологические и экологические аспекты утилизации гальваношламов // Экология и промышленность России. 2007. № 6. С. 24–25.

8. Гигина О.С., Быковский Н.А., Кантор Е.А. Электрохимическая очистка разбавленных растворов травления производства печатных плат // Теоретическая и прикладная экология. 2009. № 4. С. 55–60.

9. Верболь С.В., Запарий М.М., Козлов В.В., Смирнов С.А. Обезвреживание гальваношламов с выделением металлов // Экология и промышленность России. 2000. Апрель. С. 28–29.

10. Ремнева Т.А., Волков М.И. Утилизация гальваношламов // Экология и промышленность России. 2003. Август. С. 16–17.

11. Сырчина Н.В., Пилип Л.В. Производство пигментов для бетона на основе железосодержащих промышленных отходов (обзор) // Теоретическая и прикладная экология. 2021. № 4. С. 50–57.

12. Марьян В.К., Кузнецов Ю.С., Новокрещенов С.Ю. Опыт утилизации промышленных отходов в Пензенской области // Экология и промышленность России. 2005. Май. С. 28–33.

13. Лурье Ю.Ю. Справочник по аналитической химии. М.: Химия, 1971. 454 с.

### References

1. Leontiev L.I., Yusfin Yu.S., Chernousov P.I. Waste: impact on the environment and ways of disposal // Ecology and Industry of Russia. 2003. No. 3. P. 32–35 (in Russian).
2. Drugov Yu.S., Rodin A.A. Analysis of contaminated soil and hazardous waste. Moskva: Izdatelstvo Binom. Laboratoriya znaniy, 2007. 424 p. (in Russian).
3. Rodionov A.I., Klushin V.N., Sister V.G. Technological processes of ecological safety (Fundamentals of environmental studies). Moskva: Vysshaya shkola, 2008. 801 p. (in Russian).
4. When will Russia be able to recycle waste like in Europe? [Internet resource] <https://www.factograph.info/a/29011375.html> (Accessed: 31.07.2022).
5. Grinin A.S., Novikov V.N. Industrial and household waste: storage, disposal, processing. Moskva: FAIR-PRESS, 2002. 332 p. (in Russian).

6. Syrchina N.V., Ashikhmina T.Ya., Kantor G.Ya. Obtaining inorganic pigments from waste galvanic industries // Theoretical and Applied Ecology. 2021. No. 1. P. 22–29 (in Russian). doi: 10.25750/1995-4301-2021-1-022-029
7. Barkan M.Sh., Fedoseev I.V., Loginova A.Yu. Technological and environmental aspects of the utilization of galvanic sludge // Ecology and Industry of Russia. 2007. No. 6. P. 24–25 (in Russian).
8. Gigina O.S., Bykovsky N.A., Kantor E.A. Electrochemical cleaning of diluted etching solutions of printed circuit boards production // Theoretical and Applied Ecology. 2009. No. 4. P. 55–60 (in Russian). doi: 10.25750/1995-4301-2009-4-055-060
9. Verbol S.V., Zapariy M.M., Kozlov V.V., Smirnov S.A. Neutralization of galvanic sludge with the release of metals // Ecology and Industry of Russia. 2000. No. 4. P. 28–29 (in Russian).
10. Remneva T.A., Volkov M.I. Utilization of galvanic sludge // Ecology and Industry of Russia. 2003. August. P. 16–17 (in Russian).
11. Syrchina N.V., Pilip L.V. Production of pigments for concrete based on iron-containing industrial waste (review) // Theoretical and Applied Ecology. 2021. No. 4. P. 50–57 (in Russian). doi: 10.25750/1995-4301-2021-4-050-057
12. Mar'in V.K., Kuznetsov Yu.S., Novokreshchenov S.Yu. Experience in industrial waste disposal in the Penza Region // Ecology and Industry of Russia. 2005. May. P. 28–33 (in Russian).
13. Lurie Yu.Yu. Handbook of analytical chemistry. Moskva: Chemistry, 1971. 454 p. (in Russian).

## Повышение эффективности биологической очистки промышленных стоков в составе городских сточных вод

© 2023. М. Ю. Дягелев, к. т. н., доцент,  
Ижевский государственный технический университет  
имени М. Т. Калашникова,  
426069, Россия, г. Ижевск, ул. Студенческая, д. 7,  
e-mail: m.yu.dyagelev@istu.ru

В статье представлены результаты исследований очистки промышленных стоков в составе городских сточных вод. В качестве метода повышения эффективности биологической очистки был использован биосорбционный способ с применением порошкообразного активного угля. Исследования были проведены на опытной установке, состоящей из четырёх ёмкостей, имитирующих работу аэротенка. В каждой серии опытов в равных пропорциях в ёмкости добавлялись сточные воды, активный ил и разные дозы специальных растворов, имитирующих промышленные стоки различного происхождения. На основе представленных результатов проведена оценка эффективности биологической очистки сточных вод в присутствии порошкообразного активного угля при разном содержании промышленных стоков в составе городских сточных вод. При содержании угля в ёмкости – 0,1 г/дм<sup>3</sup> эффективность очистки сточных вод от имитационных стоков пищевой промышленности по обобщённому показателю «химическое потребление кислорода» составила 67,9%, а эффективность очистки стоков, содержащих нефтепродукты, достигла 95,5%.

**Ключевые слова:** биологическая очистка, промышленные стоки, активный ил, биосорбция, порошкообразный активный уголь.

## Improving the efficiency of biological treatment of industrial wastewater as part of urban wastewater

© 2023. M. Yu. Dyagelev ORCID: 0000-0002-4949-2646  
Kalashnikov Izhevsk State Technical University,  
7, Studencheskaya St., Izhevsk, Russia, 426069,  
e-mail: m.yu.dyagelev@istu.ru

The article presents the results of studies of treatment of industrial wastewater as a part of urban wastewater. A biosorption method using powdered activated carbon was used as a method to increase the efficiency of biological purification. The research was carried out on a pilot plant consisting of four tanks simulating the operation of an aerotank. In each series of experiments, wastewater, activated sludge and special solutions simulating industrial effluents of different origin were added in equal proportions to the tank. Based on the presented results, an assessment of the effectiveness of biological wastewater treatment in the presence of powdered activated carbon with a different content of industrial effluents in the composition of urban wastewater was carried out. At the concentration of coal in the tank 0.1 g/dm<sup>3</sup> efficiency of wastewater treatment of simulated effluent from the food industry on the generalized indicator “chemical oxygen demand” was 67.9%, and the efficiency of treatment of wastewater containing petroleum products reached 95.5%.

**Keywords:** biological treatment, industrial effluents, active sludge, biosorption, powdered activated carbon.

Городские сточные воды (СВ) представляют собой сложную многокомпонентную смесь переменного состава (растворимые и нерастворимые органические и минеральные примеси, поверхностно активные вещества и другие соединения). Кроме того, на городские канализационные очистные сооружения может поступать до 30–35% сточных вод от

промышленных предприятий (в некоторых городах количество производственных СВ достигает 50% и более от общего количества СВ) [1–3]. Сброс СВ от промышленных предприятий, концентрации загрязняющих веществ в которых превышают согласованный сброс в городскую канализацию, приводит к нарушению работы очистных сооружений,

особенно сооружений биологической очистки СВ [4]. Основная проблема в этом случае заключается не в ухудшении качества очистки, а в нарушении работы сложной биосистемы в целом [5] – процессы биохимической очистки начинают проходить крайне медленно и не в полном объёме, часть промышленных стоков без обработки попадает в поверхностные водоёмы, что может представлять угрозу для окружающей среды.

Характер экологической угрозы будет зависеть от количества и состава промышленных стоков. Например, при попадании на очистные сооружения стоков пищевой промышленности из-за высокой концентрации легкоокисляемой органики (ЛО) снижается эффективность окисления активным илом углеродсодержащих соединений. При попадании стоков, содержащих повышенные концентрации нефтепродуктов (НП), резко снижается концентрация растворённого кислорода в сооружениях биологической очистки [5–9], что приводит к снижению эффективности, а в ряде случаев – к полной остановке процессов удаления азота и фосфора.

Согласно [6], наибольшую опасность для очистных сооружений канализации (ОСК) представляют экстремальные сбросы токсичных примесей, а также сбросы НП и ЛО, приводящие к пенообразованию в аэротенках, так как биологическая ступень очистки СВ рассчитана на определённый перечень и концентрации загрязняющих веществ в составе СВ. Залповый сброс НП и ЛО можно отследить по резкому увеличению значения такого параметра, как химическое потребление кислорода (ХПК) в поступающей сточной воде [1]. Для предотвращения нарушения биологической очистки на ОСК рекомендуется увеличить до 50% расход подаваемого воздуха и увеличить на 25% расход избыточного активного ила [1]. Однако, ряд авторов [5, 8, 10–18] предлагает биосорбционный вариант очистки стоков от токсичных примесей, НП и ЛО, при этом в качестве сорбента предлагается использовать некоторые виды активных углей, в частности, порошкообразный активный уголь (ПУ).

В отличие от других методов очистки и доочистки, таких как мембранная фильтрация, озонирование, УФ-обработка, электроокисление, биосорбция не требует устройства дополнительных сооружений и позволяет проводить очистку СВ в рамках существующего технологического процесса без нанесения ущерба активному илу – основному инструменту биологической ступени очистки сточных вод.

Цель данной работы – исследование особенностей биосорбционной очистки сточных вод, загрязнённых нефтепродуктами и легкоокисляемой органикой, для определения концентрации порошкообразного активного угля, при которой сохранится эффективность работы аэротенков.

### Объекты и методы исследования

Работы проводили на одном из муниципальных унитарных предприятий Удмуртской Республики с реальными городскими стоками.

Объектом исследования являлись городские сточные воды. Для моделирования загрязнения СВ нефтепродуктами к городским сточным водам добавляли бензин, для имитации загрязнения стоками пищевой и перерабатывающей промышленности (хлебопекарной, молочной, пивоваренной и т. д.) в городские сточные воды добавляли спиртовой раствор (СР). Таким образом, в эксперименте имитировали залповый сброс НП и ЛО, приводящий к повышению ХПК в СВ. Химическое потребление кислорода – один из параметров контроля очистки СВ на ОСК, по его изменению оценивается эффективность очистки СВ, в том числе, при залповых сбросах загрязняющих веществ.

На крупных ОСК проводится онлайн-мониторинг нескольких интегральных показателей, в том числе и ХПК, поскольку проведение количественного и качественного анализа по каждому компоненту СВ может занимать от нескольких минут до нескольких часов [1]. Кроме того, в результате химических и биологических процессов изменяется состав СВ, особенно содержащих стоки пищевой промышленности, поэтому для оценки эффективности их очистки следует применять систему маркеров [9]. Нефтепродукты в процессе очистки СВ претерпевают менее значимые изменения [8]. В обоих случаях при залповом поступлении НП и ЛО на ОСК эффективность очистки СВ оценивается по изменению ХПК.

Для проведения эксперимента была разработана и смонтирована установка, имитирующая работу аэротенка, состоящая из четырёх ёмкостей объёмом 7 л, компрессоров и аэраторов. Максимальная производительность компрессора составляла 5 л/мин, и подаваемый воздух использовали для обеспечения жизнедеятельности активного ила, а также для перемешивания активного ила и ПУ [19]. Для аэрации применяли круглые аэраторы диаметром 130 мм с дисперсностью пузырьков воздуха  $0,35 \pm 0,15$  мм.



Для повышения эффективности биосорбционной очистки СВ подвергали предварительной механической очистке с целью удаления крупнодисперсных примесей [14, 16], после чего стоки в равных пропорциях разливались по ёмкостям. К осветлённым СВ объёмом  $4000 \pm 100$  мл добавляли  $1000 \pm 50$  мл возвратного активного ила и дозы растворов, имитирующих промышленные стоки (табл. 1).

Дозы рассчитывали таким образом, чтобы имитировать аварийный или залповый сброс. В частности, концентрация НП была увеличена в 3–6 раз по сравнению с максимально допустимым значением для ОСК – до  $0,375$  мг/дм<sup>3</sup> (для объёмного дозирования мг/дм<sup>3</sup> были пересчитаны в мл/дм<sup>3</sup>). Доза НП была эмпирически подобрана таким образом, чтобы в процессе аэрации в ёмкостях оставалась плёнка, но не происходило образования водонефтяной эмульсии, для сорбции которой применяют другие методы [20]. Концентрация НП в осветлённых стоках варьировала от  $0,16$  до  $0,187$  мг/дм<sup>3</sup>, а после добавления НП повышалась до  $1,02$ – $1,36$  мг/дм<sup>3</sup> в сериях опытов 3 и 4 и до  $2,33$ – $2,41$  мг/дм<sup>3</sup> в сериях опытов 5 и 6.

Дозу СР подбирали так, чтобы ХПК было в несколько раз выше допустимых значений для ОСК (до  $500$  мгО/дм<sup>3</sup>), итоговое значение ХПК превысило допустимое в 4 раза. В осветлённых СВ значение ХПК варьировало от  $230$  до  $330$  мгО/дм<sup>3</sup>. После добавления СР значение ХПК увеличивалось до  $2040$ – $2260$  мгО/дм<sup>3</sup>. Концентрация активного ила в каждой ёмкости составляла от  $0,6$  до  $0,8$  г/дм<sup>3</sup>.

В качестве сорбента использовали порошкообразный активный уголь (ПУ), который в виде пульпы (с 5% содержанием ПУ) добавляли в каждую ёмкость. Пульпу готовили заранее – навеску ПУ замачивали в горячей воде ( $77,5 \pm 2,5$  °С) и перемешивали с помощью магнитной мешалки в течение 8 ч [16]. Варианты опыта по биосорбционной очистке СВ городской канализации после залповых сбросов НП и ЛО представлены в таблице 1. Эксперимент проводили в четырёхкратной повторности.

Начало эксперимента фиксировалось с момента добавления растворов НП и СР. Отбор проб во всех сериях опытов проводили через 30, 60, 90, 150 мин после добавления растворов. Все пробы перед определением ХПК фильтровали через бумажный фильтр.

Определение ХПК проводили методом окисления серной кислотой и бихроматом калия при температуре  $150 \pm 5$  °С в термореакторе в присутствии катализатора окисления – сульфата серебра и сульфита ртути(II), используемого для снижения влияния присутствующих в городских СВ хлоридов [21].

После обработки в термореакторе ХПК определяли на приборе «Флюорат-02». Полученные значения ХПК из параллелей в 4 сериях для каждого варианта опыта статистически обрабатывали в среде MS Excel.

### Результаты и обсуждение

Результаты измерений значения ХПК в вариантах опытов в зависимости от времени представлены в таблице 2. Во всех сериях

Таблица 1 / Table 1

Варианты опыта по биосорбционной очистке сточных вод после залповых сбросов нефтепродуктов и легкоокисляемой органики / Variants of experiments on biosorption treatment of wastewater after salvo discharges of petroleum products and easily oxidizable organic

Вариант опыта Option of experiment	Вид раствора Type of solution	Объём раствора, мл Solution volume, mL	Значение ХПК растворов, мгО/дм <sup>3</sup> COD value of solutions, mgO/dm <sup>3</sup>	Значение ХПК смеси СВ и раствора, мгО/дм <sup>3</sup> COD value of wastewater mixture and solution, mgO/dm <sup>3</sup>	Объём пульпы ПУ, мл PAC pulp volume, mL
1	СР	$5,0 \pm 0,5$	$3490 \pm 38$	$2150 \pm 108$	–
2	АС				$10,0 \pm 0,5$
3	НП	$5,0 \pm 0,5$	$2200 \pm 56$	$1930 \pm 97$	–
4					$10,0 \pm 0,5$
5	ОП	$10,0 \pm 0,5$	$2200 \pm 56$	$1760 \pm 88$	–
6					$10,0 \pm 0,5$

Примечание: СР – спиртовой раствор; НП – нефтепродукты; в осветлённых СВ значение ХПК варьировало от  $230$  до  $330$  мгО/дм<sup>3</sup>.

Note: AS – alcohol solution; OP – oil products; in clarified wastewater, the COD value varied from  $230$  to  $330$  mgO/dm<sup>3</sup>.

Таблица 2 / Table 2

Изменение значений ХПК при биосорбционной очистке сточных вод, загрязнённых нефтепродуктами и легкоокисляемой органикой / Changes in COD value during biosorption treatment of wastewater contaminated with petroleum products and readily oxidizable organics

Вариант опыта Option of experiment	Значение ХПК смеси СВ и раствора, мгО/дм <sup>3</sup> COD value of wastewater mixture and solution, mgO/dm <sup>3</sup>	Продолжительность опыта / Duration of experiment							
		30 мин / 30 min		60 мин / 60 min		90 мин / 90 mins		150 мин / 150 min	
		ХПК, мгО/дм <sup>3</sup> COD, mgO/dm <sup>3</sup>	степень очистки, % cleaning degree, %	ХПК, мгО/дм <sup>3</sup> COD, mgO/dm <sup>3</sup>	степень очистки, % cleaning degree, %	ХПК, мгО/дм <sup>3</sup> COD, mgO/dm <sup>3</sup>	степень очистки, % cleaning degree, %	ХПК, мгО/дм <sup>3</sup> COD, mgO/dm <sup>3</sup>	степень очистки, % cleaning degree, %
1	2150±110	1770±90	17,6	1460±70	17,6	900±50	58,1	840±40	61,0
2	2150±110	860±40	59,9	710±40	59,9	750±40	65,0	690±30	67,9
3	1930±100	317±16	83,6	479±24	83,6	419±21	78,3	306±15	84,2
4	1930±100	165±8	91,5	198±10	91,5	187±9	90,3	188±9	90,3
5	1760±90	1380±70	21,6	790±40	21,6	710±40	59,5	610±30	65,3
6	1690±80	408±20	75,9	226±11	75,9	108±5	93,6	76±4	95,5

опытов было установлено, что наибольшая эффективность окисления по ХПК достигается в присутствии в ёмкости ПУ (концентрация ПУ – 0,1 г/дм<sup>3</sup>). В стоках с СР в присутствии ПУ была достигнута эффективность окисления по ХПК – 59,9% в течение первых 30 мин после обработки. В дальнейшем эффективность окисления по ХПК увеличивалась не столь значительно и к концу эксперимента составляла 67,9%. Для сравнения – в контрольной серии (без добавления ПУ) за первые 30 мин эффективность окисления по ХПК составила только 17,6%, а итоговое значение составило 61%.

В сериях опытов со СВ, содержащими НП, лучшие итоговые результаты удалось получить при увеличении концентрации НП в два раза – с 1,02–1,36 мл/дм<sup>3</sup> до 2,33–2,41 мл/дм<sup>3</sup>. В сериях опытов с концентрацией НП 1,02–1,36 мл/дм<sup>3</sup> в ёмкостях с ПУ эффективность окисления по ХПК в среднем достигала 91,5% через 30 мин после обработки СВ, что является лучшим результатом в данном временном интервале. Итоговое значение эффективности окисления по ХПК через 150 мин после начала эксперимента в данном варианте почти не изменилось и составило 90,3% (в контрольной серии – 84,2%), что может свидетельствовать о наступлении адсорбционного равновесия.

В сериях опыта с увеличенными концентрациями НП эффективность окисления по ХПК в ёмкостях с ПУ через 30 мин после обработки составила 75,9% (в контрольной серии – 21,6%), а к концу эксперимента достигла 95,5% (в контрольной серии только 65,3%).

Полученные результаты исследований изменения значения ХПК при биосорбционной очистке СВ, загрязнённых НП и СР, показали высокую сходимость с данными других авторов [2, 5, 14, 22–23].

Во всех сериях опытов наибольшее снижение ХПК происходит в первые 30 минут действия ПУ и активного ила (табл. 2, рис.). В контрольных сериях опытов, обозначенных номерами 1 и 5, где СВ проходили только биологическую очистку, снижение ХПК происходило постепенно, так как для очистки СВ от специфических загрязняющих веществ с помощью активного ила требуется больше времени. Также можно отметить, что через 60 мин после обработки стоков снижение значения ХПК замедляется во всех вариантах опыта, и дальнейшая очистка СВ не даёт эффекта даже при увеличении дозы ПУ, особенно в варианте с добавлением в СВ СР.

В третьем варианте (кривая 3 на рис.) при отсутствии в ёмкости ПУ резкое падение ХПК наблюдалось в течение первых 30 мин во всех четырёх повторностях. В аналогичных опытах (без добавления ПУ) активное окисление по ХПК продолжалось в течение 90 мин (кривые 1 и 5 на рис.). В данном варианте, несмотря на превышение допустимой концентрации НП для ОСК в 3 раза, значение ХПК через 150 мин уменьшилось более чем в 6 раз, в то время как в вариантах 1 и 5 (табл. 1 и 2) за аналогичный промежуток времени значение ХПК снизилось менее чем в 3 раза.

Сравнивая итоговые значения эффективности очистки СВ по ХПК после имитации

залпового сброса НП можно отметить, что в третьем варианте (без ПУ) оно составило только 84,2%, в то время как в четвертом варианте (с добавлением ПУ) эффективность окисления по ХПК достигла 90,3%. Сравнивая третий вариант с пятым, в котором содержание НП в СВ было в два раза выше, было выявлено, что итоговая эффективность окисления по ХПК в пятом варианте составила только 65,3% (в ёмкости с ПУ – 95,5%). Таким образом, при залповых сбросах НП с концентрацией 1,02–1,36 мл/дм<sup>3</sup> работа ОСК может обеспечить эффективность очистки до 84%, однако, при росте концентрации НП до 2,41 мл/дм<sup>3</sup> требуется ввод сорбирующих материалов, так как в противном случае эффективность очистки по ХПК не будет превышать 65%.

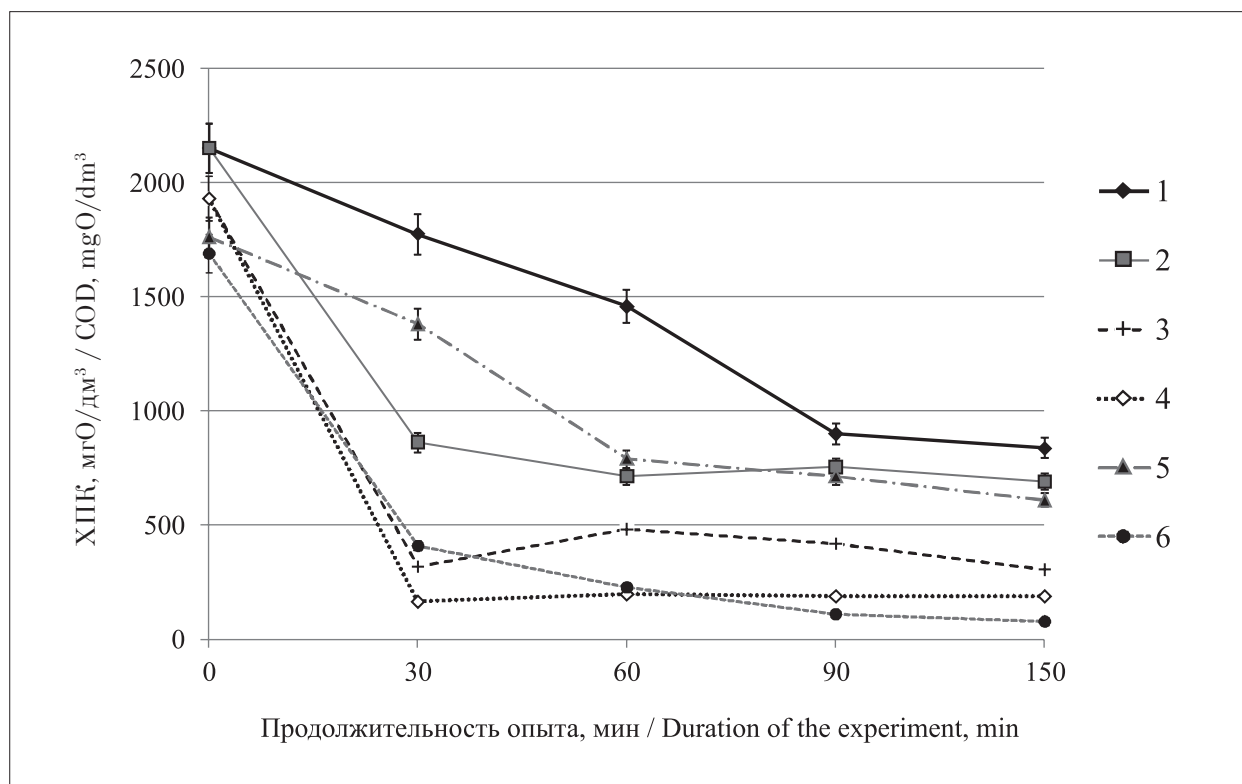
### Заключение

Результаты исследований показывали, что при залповых или аварийных сбросах в коммунальные сточные воды стоков пищевой

промышленности или нефтепродуктов применение в аэротенках в качестве сорбента пульпы ПУ позволяет сохранить эффективность работы очистных сооружений канализации.

При имитации залповых сбросов стоков пищевой промышленности добавление 5 мл спиртового раствора к 5 л сточных вод городской канализации привело к резкому росту ХПК с 230–330 мгО/дм<sup>3</sup> до 2150 мгО/дм<sup>3</sup>. Добавление в сточные воды 5 мл нефтепродуктов также сопровождалось резким ростом ХПК до 1930 мгО/дм<sup>3</sup>, добавление 10 мл нефтепродуктов способствовало увеличению ХПК до 1760 мгО/дм<sup>3</sup>.

Для снижения роста ХПК при биосорбционной очистке коммунальных сточных вод, загрязнённых промышленными стоками, в качестве сорбента в модельном эксперименте использовали пульпу ПУ с концентрацией 0,1 г/дм<sup>3</sup>. Через 30 минут после добавления ПУ в ёмкостях со спиртовым раствором значение ХПК снизилось на 59,9%, с нефтепродуктами – на 91,5%, в то время как в варианте



**Рис.** Изменение значения ХПК в нескольких сериях опытов: 1) контрольная серия без добавления ПУ, концентрация СВ 1 мл/дм<sup>3</sup>; 2) концентрация ПУ 0,1 г/дм<sup>3</sup>, концентрация СВ 1 мл/дм<sup>3</sup>; 3) контрольная серия без добавления ПУ, концентрация НП 1 мл/дм<sup>3</sup>; 4) концентрация ПУ 0,1 г/дм<sup>3</sup>, концентрация НП 1 мл/дм<sup>3</sup>; 5) контрольная серия без добавления ПУ, концентрация НП 2 мл/дм<sup>3</sup>; 6) концентрация ПУ 0,1 г/дм<sup>3</sup>, концентрация НП 2 мл/дм<sup>3</sup>

**Fig.** Change of COD value in several series of experiments: 1) control series without adding powdered activated carbon (PAC), alcohol solution (AS) concentration 1 mL/dm<sup>3</sup>; 2) PAC concentration 0.1 g/dm<sup>3</sup>, AS concentration 1 mL/dm<sup>3</sup>; 3) control series without addition of PAC, oil product concentration 1 mL/dm<sup>3</sup>; 4) PAC concentration 0.1 g/dm<sup>3</sup>, oil product concentration 1 mL/dm<sup>3</sup>; 5) control series without adding PAC, oil product concentration 2 mL/dm<sup>3</sup>; 6) PAC concentration 0.1 g/dm<sup>3</sup>, oil product concentration 2 mL/dm<sup>3</sup>

без ПУ – на 17,6 и 83,6% соответственно. Со временем (в течение 150 мин наблюдений) эффективность очистки сточных вод с добавлением спиртового раствора в контрольном варианте (без ПУ) значительно возросла, однако значения ХПК всё равно оставались более высокими по сравнению с опытными (с ПУ) – 840 и 690 мгО/дм<sup>3</sup> соответственно.

В эксперименте с НП эффективность очистки сточных вод методом биосорбции была довольно высокой как в контрольном варианте, так и в варианте с ПУ, однако при двукратном увеличении дозы нефтепродуктов в сточных водах очистка сточных вод с участием ПУ была в три раза эффективнее, особенно в течение первых 30 мин после добавления НП в СВ.

При этом следует отметить, что постоянное применение ПУ может быть экономически нецелесообразным, учитывая необходимость дополнительных сооружений для приготовления и хранения пульпы, а также необходимость регенерации ПУ после его использования. Вариантом решения проблемы может быть доставка расчётного объёма пульпы ПУ на очистные сооружения от станций водоподготовки после получения сообщения от промышленных предприятий о залповых или аварийных сбросах стоков.

### Литература

1. Харькина О.В. Эффективная эксплуатация и расчёт сооружений биологической очистки сточных вод. Волгоград: Панорама, 2015. 433 с.
2. Nikolaeva L.A., Laptev A.G., Iskhakova R.Ya. Wastewater treatment of industrial enterprises using carbonate sludge // Nature Environment and Pollution Technology. 2015. V. 14. No. 4. P. 947–950.
3. Dyagelev M.Y., Nepogodin A.M., Grakhova E.V. Determination of the flotation effectiveness of industrial waste water in a laboratory // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2020. Article No. 042077.
4. Фризоргер Г.Г., Исаков В.Г., Абрамова А.А. Применение метода иерархий в оценке эффективности обращения с жидкими отходами в процессе уничтожения высокотоксичных веществ // Теоретическая и прикладная экология. 2012. № 4. С. 50–55.
5. Шлёкова И.Ю., Кныш А.И. Повышение эффективности аэробной биологической очистки нефтесодержащих сточных вод // Теоретическая и прикладная экология. 2021. № 1. С. 203–209.
6. Данилович Д.А., Козлов М.Н., Мойжес О.В., Исаков В.Г., Шотина К.В. Технологические мероприятия эксплуатации сооружений биологической очистки в

аварийных и экстремальных условиях // Сборник статей и публикаций Московского водоканала. М.: Мосводоканал, 2008. С. 154–163.

7. Феофанов Ю.А., Ряховский М.С. О применении природных сорбентов для очистки воды от нефтепродуктов // Водоочистка. Водоподготовка. Водоснабжение. 2018. № 6 (126). С. 32–38.

8. Nikolaeva L.A., Iskhakova R.Ia. Enhancement of biological treatment of petrochemical industry wastewater // Vodosnabzhenie i Sanitarnaia Tekhnika. 2016. No. 11. P. 50–55.

9. Reif D., Saracevic E., Runjavec M.Š., Haslinger J., Schaar H., Kreuzinger N. Desorption of organic micropollutants from loaded granular activated carbon // Water. 2020. V. 12. No. 10. Article No. 2754.

10. Ferri M., Campisi S., Polito L., Shen J., Gervasini A. Tuning the sorption ability of hydroxyapatite/carbon composites for the simultaneous remediation of wastewaters containing organic-inorganic pollutants // Journal of Hazardous Materials. 2021. V. 420. Article No. 126656.

11. Сироткин А.С., Шулаев М.В., Понкратова С.А., Нуруллина Е.Н., Емельянов В.М. Биосорбционные технологии очистки сточных вод // Вестник Казанского технологического университета. 2010. № 6. С. 65–75.

12. Информационно-технический справочник по наилучшим доступным технологиям ИТС 10-2015. Очистка сточных вод с использованием централизованных систем водоотведения поселений, городских округов. М.: Бюро НДТ, 2015. 395 с.

13. Corral-Bobadilla M., Lostado-Lorza R., Somovilla-Gómez F., Escribano-García R. Effective use of activated carbon from olive stone waste in the biosorption removal of Fe(III) ions from aqueous solutions // Journal of Cleaner Production. 2021. V. 294. Article No. 126332.

14. Сироткин А.С., Понкратова С.А., Шулаев М.В. Современные технологические концепции аэробной очистки сточных вод. Казань: Изд-во КГТУ, 2002. 163 с.

15. Рахимьянова Л.Р., Дряхлов В.О., Шайхиев И.Г., Свергузова С.В. Комбинированная очистка водомасляной эмульсии с использованием мембран и адсорбционным методом // Вестник Технологического университета. 2018. Т. 21. № 5. С. 90–93.

16. Decrey L., Bonvin F., Bonvin Ch., Bonvin E., Kohn T. Removal of trace organic contaminants from wastewater by superfine powdered activated carbon (SPAC) is neither affected by SPAC dispersal nor coagulation // Water Research. 2020. V. 185. Article No. 116302.

17. Скугорева С.Г., Кантор Г.Я., Домрачева Л.И. Биосорбция тяжёлых металлов микромицетами: особенности процесса, механизмы, кинетика // Теоретическая и прикладная экология. 2019. № 2. С. 14–31.

18. Горелкина А.К., Тимощук И.В., Голубева Н.С., Беляева О.В., Гора Н.В., Иванова Л.А. Адсорбция хлор- и кислородсодержащих загрязняющих веществ из сточных вод активными углями // Теоретическая и прикладная экология. 2022. № 4. С. 28–37.

19. Dyagelev M.Y., Pavlov I.I., Nepogodin A.M., Grakhova E.V., Lapina A.A. The review of aeration systems for biological wastewater treatment // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 2021. V. 839 (4). Article No. 042035.

20. Чаплина Т.О., Пахненко В.П. Особенности очистки поверхностных вод от углеводов с использованием природных сорбентов // Теоретическая и прикладная экология. 2022. № 4. С. 38–44.

21. ПНД Ф 14.1:2:4.190-2003. Количественный химический анализ вод. Методика измерения бихроматной окисляемости (химическое потребление кислорода) в пробах природных, питьевых и сточных вод фотометрическим методом с применением анализатора жидкости «Флюорат-02». М., 2003. 28 с.

22. Кирсанов В.В. Влияние соотношения рециркуляционного активного ила и химстока, периода аэрации на эффективность биоокисления по ХПК и токсичности в трёхкоридорных аэротенках // Вестник Казанского технологического университета. 2014. Т. 17. № 13. С. 250–251.

23. Tchobanoglous G., Burton F.L., Stensel H.D. Wastewater Engineering, Treatment and Reuse (Fourth Edition). Lasing: McGraw-Hill, 2003. 1820 p.

### References

1. Harkina O.V. Efficient operation and calculation of biological wastewater treatment facilities. Volgograd: Panorama, 2015. 433 p. (in Russian).

2. Nikolaeva L.A., Laptev A.G., Iskhakova R.Ya. Wastewater treatment of industrial enterprises using carbonate sludge // Nature Environment and Pollution Technology. 2015. V. 14. No. 4. P. 947–950 (in Russian).

3. Dyagelev M.Y., Nepogodin A.M., Grakhova E.V. Determination of the flotation effectiveness of industrial waste water in a laboratory // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. Article No. 042077. doi: 10.1088/1757-899X/962/4/042077

4. Frizorger G.G., Isakov V.G., Abramova A.A. Application of a hierarchy analysis method at assessing the efficiency of handling liquid waste during highly toxic substances decommission // Theoretical and Applied Ecology. 2012. No. 4. P. 50–55 (in Russian). doi: 10.25750/1995-4301-2012-4-059-063

5. Shlyakova I.Yu., Knysh A.I. Improving the efficiency of aerobic biological purification of oily wastewater // Theoretical and Applied Ecology. 2021. No. 1. P. 203–209 (in Russian). doi: 10.25750/1995-4301-2021-1-203-209

6. Danilovich D.A., Kozlov M.N., Mojzes O.V., Isakov V.G., Shotina K.V. Technological measures of operation of biological treatment facilities in emergency and extreme conditions // Collection of articles and publications of Moscow Vodokanal. Moskva: Mosvodokanal, 2008. P. 154–163 (in Russian).

7. Feofanov Yu.A., Ryakhovsky M.S. On the use of natural sorbents for water purification from petroleum products // Vodoochistka. Vodopodgotovka. Vodosnabzhenie. 2016. No. 6 (126). P. 32–38 (in Russian).

8. Nikolaeva L.A., Iskhakova R.Ia. Enhancement of biological treatment of petrochemical industry wastewater // Vodosnabzhenie i sanitarnaia tekhnika. 2016. No. 11. P. 50–55 (in Russian).

9. Reif D., Saracevic E., Runjavec M.Š., Haslinger J., Schaar H., Kreuzinger N. Desorption of organic micropollutants from loaded granular activated carbon // Water. 2020. V. 12. No. 10. Article No. 2754. doi: 10.3390/w12102754

10. Ferri M., Campisi S., Polito L., Shen J., Gervasini A. Tuning the sorption ability of hydroxyapatite/carbon composites for the simultaneous remediation of wastewaters containing organic-inorganic pollutants // Journal of Hazardous Materials. 2021. V. 420. Article No. 126656. doi: 10.1016/j.jhazmat.2021.126656

11. Sirotkin A.S., Shulaev M.V., Pankratova S.A., Nurullina E.N., Emelyanov V.M. Biosorption technologies of wastewater treatment // Bulletin of Kazan Technological University. 2010. No. 6. P. 65–75 (in Russian).

12. Information and technical guide to the best available technologies ITG 10-2015 Wastewater treatment using centralized wastewater disposal systems of settlements, urban districts. Moskva: NDT Bureau, 2015. 395 p. (in Russian).

13. Corral-Bobadilla M., Lostado-Lorza R., Somovilla-Gómez F., Escribano-García R. Effective use of activated carbon from olive stone waste in the biosorption removal of Fe(III) ions from aqueous solutions // Journal of Cleaner Production. 2021. V. 294. Article No. 126332. doi: 10.1016/j.jclepro.2021.126332

14. Sirotkin A.S., Ponkratova S.A., Shulaev M.V. Modern technological concepts of aerobic wastewater treatment. Kazan: Publishing House of KSTU, 2002. 163 p. (in Russian).

15. Rakhimyanova L.R., Dryakhlov V.O., Shaikhiyev I.G., Sverguzova S.V. Combined purification of water-oil emulsion using membranes and adsorption method // Bulletin of the Technological University. 2018. V. 21. No. 5. P. 90–93 (in Russian).

16. Decrey L., Bonvin F., Bonvin Ch., Bonvin E., Kohn T. Removal of trace organic contaminants from wastewater by superfine powdered activated carbon (SPAC) is neither affected by SPAC dispersal nor coagulation // Water Research. 2020. V. 185. Article No. 116302. doi: 10.1016/j.watres.2020.116302

17. Skugoreva S.G., Kantor G.Ya., Domracheva L.I. Biosorption of heavy metals by micromycetes: specificity of the process, mechanisms, kinetics // Theoretical and Applied Ecology. 2019. No. 2. P. 14–31 (in Russian). doi: 10.25750/1995-4301-2019-2-014-031

18. Gorelkina A.K., Timoshchuk I.V., Golubeva N.S., Belyaeva O.V., Gora N.V., Ivanova L.A. Adsorption of chlo-

rine- and oxygen-containing pollutants from wastewater by activated carbons // *Theoretical and Applied Ecology*. 2022. No. 4. P. 28–37 (in Russian). doi: 10.25750/1995-4301-2022-4-028-037

19. Dyagelev M.Y., Pavlov I.I., Nepogodin A.M., Grakhova E.V., Lapina A.A. The review of aeration systems for biological wastewater treatment // *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2021. V. 839. No. 4. Article No. 042035. doi: 10.1088/1755-1315/839/4/042035

20. Chaplina T.O., Pakhnenko V.P. Peculiarities of surface water purification from hydrocarbons using natural sorbents // *Theoretical and Applied Ecology*. 2022. No. 4. P. 38–44 (in Russian). doi: 10.25750/1995-4301-2022-4-038-044

21. PND F 14.1:2:4.190-2003. Quantitative chemical analysis of water. Methods for measuring bichromate acidity (chemical oxygen demand) in natural, potable and waste water samples by photometric method using “Fluorat-02” liquid analyzer. Moskva, 2003. 28 p. (in Russian).

22. Kirsanov V.V. Influence of the ratio of recirculating activated sludge and chemical stock, aeration period on the efficiency of biooxidation by COD and toxicity in three-corridor aerotanks // *Bulletin of Kazan Technological University*. 2014. V. 17. No. 13. P. 250–251 (in Russian).

23. Tchobanoglous G., Burton F.L., Stensel H.D. *Wastewater Engineering. Treatment and Reuse* (Fourth Edition). Lasing: McGraw-Hill, 2003. 1820 p.

## Влияние состава торфосмесей на биохимические показатели растений мелиссы лекарственной

© 2023. А. И. Фокина<sup>1</sup>, к. б. н., доцент,  
С. Г. Скугорева<sup>2</sup>, к. б. н., н. с.,  
Е. А. Кислицына<sup>1</sup>, студент,

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

<sup>2</sup>Институт биологии Коми научного центра  
Уральского отделения Российской академии наук,  
167982, Россия, г. Сыктывкар, ул. Коммунистическая, д. 28,  
e-mail: annushka-fokina@mail.ru

В ходе модельного эксперимента изучено влияние состава торфосмесей из песка, низинного торфа и дерново-подзолистой супесчаной почвы на содержание полифенолов, фотосинтетических пигментов, суммы антиоксидантов и малонового диальдегида в листьях мелиссы лекарственной сорта «Лимонный аромат». Установлено, что наиболее оптимальными составами торфосмесей для выращивания растений мелиссы лекарственной являются составы со следующими соотношениями компонентов (м. ч. – массовая часть): 1 смесь – 1 м. ч. почва + 2 м. ч. песок + 2 м. ч. торф; 2 смесь – 1 м. ч. почва + 3 м. ч. песок + 1 м. ч. торф. При выращивании растений на данных торфосмесях отмечается большее накопление биологически активных веществ (фенольных соединений, фотосинтетических пигментов, антиоксидантов), снижение содержания маркера окислительного стресса – малонового диальдегида по сравнению с почвой, торфом и вариантом опыта с высоким содержанием торфа (1 м. ч. почва + 1 м. ч. песок + 3 м. ч. торф). При внесении в торфосмесь удобрения «SOLAR УНИВЕРСАЛ – 18:18:18 + 3MgO + МЭ», особенно в дозе 1 мл на 50 г субстрата (концентрация удобрения 2 г/л), отмечали максимальные значения содержания фотосинтетических пигментов и антиоксидантов в листьях мелиссы. Указанные выше варианты торфосмесей могут быть рекомендованы к применению в качестве грунтов для выращивания мелиссы лекарственной.

**Ключевые слова:** торфосмеси, мелисса лекарственная, полифенолы, фотосинтетические пигменты, сумма антиоксидантов, малоновый диальдегид.

## The influence of the composition of peat mixtures on the biochemical parameters of *Melissa officinalis* plants

© 2023. A. I. Fokina<sup>1</sup> ORCID: 0000-0001-8265-8882<sup>†</sup>

S. G. Skugoreva<sup>2</sup> ORCID: 0000-0002-5902-5187<sup>†</sup>

E. A. Kislitsyna<sup>1</sup> ORCID: 0009-0007-7516-1000<sup>†</sup>

<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 the Russian Academy of Sciences,

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

e-mail: annushka-fokina@mail.ru

In the course of a model experiment, the influence of the composition of peat mixtures from sand, lowland peat and soddy-podzolic sandy loamy soil on the content of polyphenols, photosynthetic pigments, the amount of antioxidants and malondialdehyde in the leaves of lemon balm medicinal variety “Limonnnyy aromat” was studied. It has been established that the most optimal compositions of peat mixtures for growing plants of lemon balm are compositions with the following ratios of components: 1st mixture – soil 1 part + sand 2 parts + peat 2 parts; 2nd mixture – soil 1 part + sand 3 parts + peat 1 part. When growing plants on these mixtures, there is a greater accumulation of biologically active substances (phenolic compounds, photosynthetic pigments, antioxidants), a decrease in the content of the oxidative stress marker –

malondialdehyde compared to soil and peat, as well as to a variant with a high content of peat (soil 1 part + sand 1 part + peat 3 parts). The addition of fertilizer "SOLAR UNIVERSAL – 18:18:18 + 3MgO + ME" to 1st peat mixture has proven itself well, especially at a dose of 1 mL per 50 g of substrate (fertilizer concentration 2 g/L). With the introduction of such a dose of fertilizer into peat mixture, the maximum values of the content of photosynthetic pigments and antioxidants in lemon balm leaves were noted. The above variants of peat mixtures can be recommended for use as soils for growing lemon balm both at home and on an industrial scale.

**Keywords:** peat mixtures, lemon balm, polyphenols, photosynthetic pigments, total antioxidants, malonic dialdehyde.

В настоящее время актуальным является получение экологически чистого и богатого биологически активными веществами (БАВ) лекарственного сырья [1, 2]. *Melissa officinalis* L. – ценное лекарственное растение за счёт содержания в ней большого количества БАВ, в том числе витаминов, флавоноидов, каротиноидов и т. д. [3]. Насущна задача круглогодичного выращивания Melissa лекарственной в условиях защищённого грунта. Молодые побеги Melissa можно использовать по назначению на 35 сутки после появления всходов [4]. В научной литературе есть данные о том, что экстракты Melissa лекарственной обладают противораковой активностью. Ведущая роль в противораковой активности отдаётся полифенольным соединениям [5, 6]. Большинство полифенолов проявляют антиоксидантные свойства, хотя к антиоксидантам относятся не только они, но и многие другие соединения, поэтому необходимо определять сумму антиоксидантов. Ведущая физиологическая роль антиоксидантов сделала их ключевым показателем качества многих культурных растений [7]. Содержащиеся в листьях растений пигменты также могут использоваться как биологически активные компоненты [8].

В целом содержание БАВ в растениях зависит от условий выращивания, в том числе и от состава субстрата [9–14]. Содержание вышеуказанных БАВ может быть не только показателем ценности лекарственного сырья, но и состояния растения. Ведущим механизмом в системе «растение – субстрат» является окислительный стресс, маркер которого – содержание малонового диальдегида (МДА) [15].

Поэтому важно проводить поиск оптимального соотношения компонентов в субстрате для выращивания растений. В литературных источниках встречаются самые разнообразные данные о способах выращивания Melissa лекарственной: гидропоника, искусственные твёрдые субстраты в тепличных и полевых условиях [4, 16]. Самыми доступными природными компонентами для создания субстратов являются почва, песок и торф. Смесь из песка и низинного торфа создаёт для суглинистой и глинистой почвы требуемый

воздушно-водный режим и рыхлокомковатую структуру, что необходимо для нормального роста и развития растений. Песок в составе смеси уплотняет и укрепляет субстрат, благодаря чему улучшаются водно-физические характеристики почвы [17]. Аминокислоты, содержащиеся в торфе, могут быть хелаторами микроэлементов, способствуя их распределению по растению [2]. Кроме того, вещества, содержащиеся в торфе, обладают адаптогенными и стимулирующими свойствами [18]. Поэтому, несмотря на поиски альтернативных торфяных субстратов, он остаётся ведущим компонентом питательных смесей для выращивания растений [8, 19, 20]. В настоящее время торфосмеси представляют собой оптимальные субстраты для выращивания растений в контейнерах [21, 22].

Данные о влиянии состава торфосмесей на биохимические показатели растений Melissa лекарственной (сумма антиоксидантов, содержание фенольных соединений, пигментов и малонового диальдегида (МДА) – маркера окислительного стресса) в научной литературе отсутствуют.

В связи с этим целью работы было исследование влияния состава торфосмесей из песка, низинного торфа и дерново-подзолистой супесчаной почвы на содержание полифенолов, фотосинтетических пигментов, суммы антиоксидантов и малонового диальдегида в листьях Melissa лекарственной сорта «Лимонный аромат».

### Объекты и методы исследования

Растения Melissa сорта «Лимонный аромат» выращивали в течение двух месяцев при температуре  $22 \pm 2$  °C, освещении светодиодной фитолампой (900 лк) и светопериоде 12 ч день/12 ч ночь на различных питательных субстратах. Выбранные параметры температуры и освещения являются оптимальными для выращивания этого растения [3].

Опытным путем установлено, что к двухмесячному возрасту Melissa набирает оптимальную массу для проведения биохимических анализов, применяемых в работе.



При проведении эксперимента использовали низинный торф, отобранный на Иготинском торфопредприятии (Кировская область, Россия), который предварительно нейтрализовали внесением карбоната кальция по ГОСТ Р 51661.4-2000. Также использовали дерново-подзолистую супесчаную почву с агрохимическими характеристиками:  $pH_{KCl} = 6,2 \pm 0,1$ ; содержание  $P(P_2O_5) - 32 \pm 8$  мг/100 г; органического вещества –  $1,64 \pm 0,33\%$ ; промытый и просушенный при температуре  $120 \pm 2$  °С речной песок. В качестве дренажа использовали керамзит.

Варианты опыта (указаны массовые части – м. ч.):  $V_1 - 1$  м. ч. почва + 1 м. ч. песок + 3 м. ч. торф;  $V_2 - 1$  м. ч. почва + 2 м. ч. песок + 2 м. ч. торф;  $V_3 - 1$  м. ч. почва + 3 м. ч. песок + 1 м. ч. торф; П – почва; Т – торф.

В результате предварительных исследований было установлено, что положительным потенциалом обладает вариант  $V_2$ , поэтому в данном эксперименте дополнительно были заложены варианты  $V_2-1$  и  $V_2-2$ . Для них состав питательной смеси был такой же как и для варианта  $V_2$ , только в вариант  $V_2-1$  дополнительно добавляли 1 мл минерального удобрения «SOLAR УНИВЕРСАЛ – 18 : 18 : 18 + 3MgO + МЭ» (АО «ОХК «Уралхим», Россия) с концентрацией 1 г/л, а в вариант  $V_2-2 - 1$  мл этого же удобрения с концентрацией 2 г/л. Приведённый выше объём раствора удобрения вносили в 50 г торфосмесей. Удобрение содержит равное количество (18%) водорастворимых форм азота, фосфора и калия, помимо шести наиболее важных для сельскохозяйственных культур микроэлементов (бор, медь, железо, марганец, молибден и цинк).

Определение pH водной вытяжки из субстратов для выращивания мяты проводили потенциометрическим методом по ГОСТ 26423-85 сразу по завершении модельного эксперимента.

В листьях двухмесячных растений определяли содержание полифенолов в пересчёте на галловую кислоту спектрофотометрически с реактивом Фолина-Чекольтеу при  $\lambda = 765$  нм по валидированной ранее методике [9]. Сумму антиоксидантов определяли методом перманганатометрии (титрование вели в присутствии серной кислоты) [23], МДА – по интенсивности окраски комплекса вытяжки с тиобарбитуровой кислотой при  $\lambda = 532$  нм [24], хлорофиллов  $a$ ,  $b$  и каротиноидов – в ацетоновом экстракте при длинах волн 662, 644 и 470 нм соответственно [25].

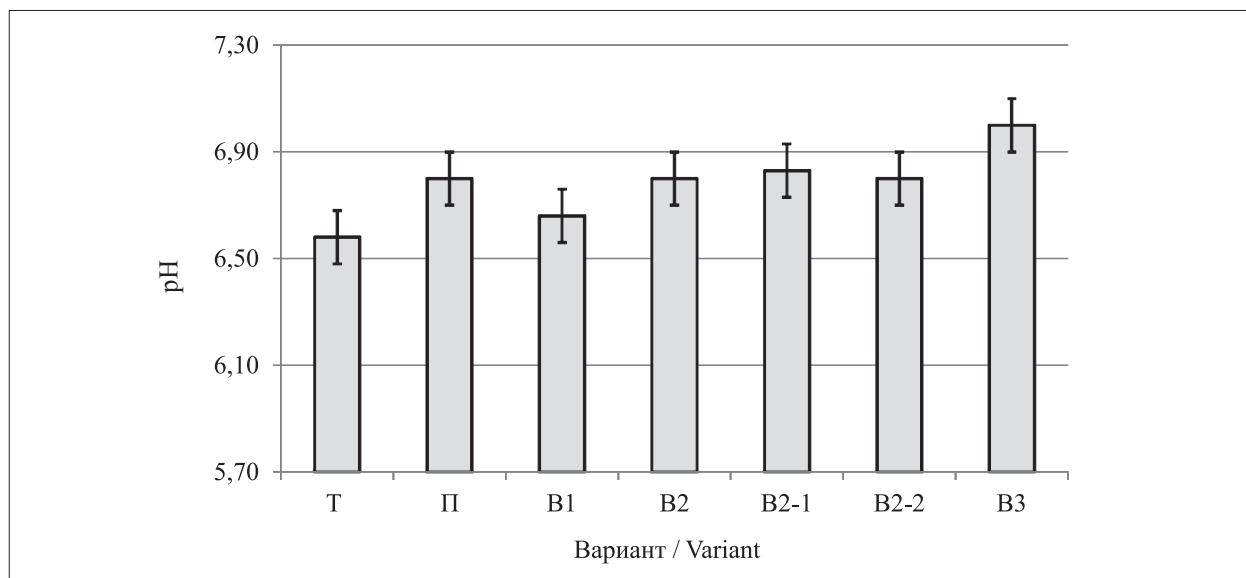
Повторность опыта при выращивании растений трёхкратная, аналитическая – двух- и трёхкратная. Статистическую обработку результатов проводили в программе Excel. В таблице представлены средние арифметические значения и ошибки средних. Достоверность различий с контролем оценивали по критерию Стьюдента.

## Результаты и обсуждение

В субстратах для выращивания мяты после проведения эксперимента значения pH водной вытяжки варьировали от 6,6 до 7,0 (рис. 1). Более кислой реакция среды была в торфе (pH 6,6), в варианте  $V_1$  отмечали несколько большее значение pH (6,7). Для вариантов  $V_2$  без и с добавкой удобрения значения pH водной вытяжки мало различались (6,8) и характеризовали среду как близкую к нейтральной. В варианте  $V_3$  торфосмесь имела нейтральную реакцию. Таким образом, добавка торфа в смесь в большем количестве ( $V_1$ ) приводила к более кислой реакции, чем в меньшем количестве ( $V_3$ ).

В растениях, выращенных на нейтрализованном торфе, биохимические показатели не определяли, так как масса листьев для анализа была недостаточной. Растения данного варианта в развитии существенно уступали растениям, выращенным на других субстратах. Использовать торф индивидуально малоэффективно, а иногда даже вредно [26]. Торф имеет высокую поглотительную способность и влагоёмкость. Поверхность торфосмеси сохнет быстро, но влаги внутри на самом деле много. Торф как губка впитывает её. Начинают образовываться закисные соединения, оказывающие негативное влияние на развитие растения [22, 27].

**Содержание фотосинтетических пигментов в растениях.** Концентрация фотосинтетических пигментов в листьях растений мяты при использовании торфосмесей была достоверно выше, чем при использовании почвы (табл.). В меньшей степени от варианта П отличался вариант  $V_3$ ; однако и в нём содержание хлорофиллов  $a$ ,  $b$  и каротиноидов было больше в 1,4; 1,3 и 1,3 раза, чем в варианте П соответственно. В остальных вариантах опыта ( $V_1$ ,  $V_2$ ,  $V_2-1$  и  $V_2-2$ ) растения мяты в большей степени накапливали фотосинтетические пигменты, чем в варианте П. При этом максимальным накоплением пигментов отличался вариант  $V_2-2$ : концентрации хлорофиллов  $a$ ,  $b$  и каротиноидов были в 1,6; 1,9 и 1,6 раза



**Рис. 1.** Значения pH почвенной вытяжки субстратов для выращивания мелиссы. Здесь и далее пояснения по обозначению вариантов приведены в тексте статьи  
**Fig. 1.** pH values of soil extract of substrates for growing lemon balm. Here and below, explanations on the designation of options are given in the text of the article

**Таблица / Table**

Содержание фотосинтетических пигментов в листьях мелиссы, мг/г сырой массы  
 Content of photosynthetic pigments in lemon balm leaves, mg/g fresh weight

Вариант Variant	Хлорофилл <i>a</i> Chlorophyll <i>a</i>	Хлорофилл <i>b</i> Chlorophyll <i>b</i>	Каротиноиды Carotenoids
П	1,02±0,11	0,52±0,10	0,267±0,029
В <sub>1</sub>	1,56±0,08**	0,82±0,04**	0,404±0,024**
В <sub>2</sub>	1,51±0,08**	0,81±0,05*	0,392±0,023**
В <sub>2</sub> -1	1,57±0,04***	0,79±0,06*	0,423±0,010***
В <sub>2</sub> -2	1,64±0,11**	1,01±0,11**	0,420±0,022**
В <sub>3</sub>	1,455±0,022**	0,667±0,002	0,35±0,06

Примечание: здесь и далее на рисунках 2–4 различия с контролем достоверны \* – при  $p < 0,1$ ; \*\* – при  $p < 0,05$ ; \*\*\* – при  $p < 0,01$ .

Note: here and below in Figures 2–4, the differences with the control are significant \* – at  $p < 0.1$ ; \*\* – at  $p < 0.05$ ; \*\*\* – at  $p < 0.01$ .

больше, чем при выращивании растений на почве. Факт влияния добавки торфа в смесь на увеличение содержания хлорофилла подтверждается литературными данными [28]. Полученные результаты могут свидетельствовать о том, что состав данной торфосмеси и дозы внесённого удобрения являются оптимальными для растений мелиссы.

**Накопление суммы фенольных соединений и антиоксидантов растениями.** Содержание фенольных соединений в листьях мелиссы варьировало от 13,9 до 44,8 мг галловой кислоты/г сырой массы в разных вариантах (рис. 2). В растениях варианта П содержание фенольных соединений было минимальным по сравнению с другими вариантами, однако

даже несколько выше, чем в наших предыдущих исследованиях в сходных условиях [9]. Существенное отличие от варианта П по содержанию фенольных соединений наблюдалось в вариантах В<sub>2</sub>, В<sub>2</sub>-1, В<sub>2</sub>-2 и В<sub>3</sub>: показатель был в 1,4; 2,1; 2,1; 3,2 раза выше, чем для варианта П соответственно. Максимальный уровень содержания полифенолов отмечали в варианте В<sub>3</sub> (44,8±2,2 мг/г).

Установлено, что сумма антиоксидантов в варианте В<sub>3</sub> тоже одна из самых высоких, выше только в варианте В<sub>2</sub>-2 (рис. 4). Величина содержания суммы антиоксидантов может быть не только показателем для оценки отклика растений на состояние грунта для выращивания, но и характеристикой качества растительного

лекарственного сырья. Согласно последнему утверждению мелисса лекарственная занимает промежуточное положение в рейтинге лекарственных растений между тимьяном обыкновенным (*Thymus vulgaris* L.) и имбирём лекарственным (*Zingiber officinale* Roscoe) по содержанию антиоксидантов [29]. В целом внесение удобрений и состав торфосмеси В<sub>3</sub> позволяет мелиссе лекарственной накопить максимальное количество соединений фенольной природы и суммы антиоксидантов. Максимальный уровень содержания антиоксидантов установлен в вариантах В<sub>2</sub>-2 и В<sub>3</sub>: 44,94±0,14 и 36,3±0,9 мг/г соответственно. Содержание фенольных соединений в варианте В<sub>3</sub> больше, чем суммы антиоксидантов. В остальных вариантах количество фенольных соединений несколько ниже, чем антиоксидантов, так как полифенолы, как правило, проявляют антиоксидантные свойства. Вероятно, данная картина объясняется разнообразием групп антиоксидантов и полифенолов в вытяжках, предназначенных для анализа. Некоторые полифенолы в вытяжке растений варианта В<sub>3</sub> менее подвержены окислению перманганатом калия.

**Накопление МДА растениями.** В листьях растений отмечали относительно невысокое содержание маркера окислительного стресса – МДА: оно колебалось от 3,2 до 6,3 мкмоль/г сырой массы в разных вариантах (рис. 5), что

близко к данным, полученным в работах [9, 10]. В варианте П растения характеризовались большим содержанием МДА, что может свидетельствовать о развитии стресса у мелиссы при выращивании на почве. В вариантах В<sub>1</sub> и В<sub>2</sub> концентрация МДА была в 1,3 раза меньше по сравнению с вариантом П, т. е. стресс у растений уменьшался при использовании вместо почвы торфосмеси. Самый низкий уровень накопления МДА в листьях мелиссы отмечали в вариантах В<sub>2</sub>-1, В<sub>2</sub>-2 и В<sub>3</sub>, он был достоверно в 1,9–2,0 раза ниже, чем в варианте П, это может свидетельствует о том, что состав данных торфосмесей является для растений оптимальным.

Таким образом, внесение удобрения в вариант 2 (В<sub>2</sub>-1 и В<sub>2</sub>-2) или изменение состава питательной смеси (В<sub>3</sub>) позволяют снизить уровень МДА до 2,0 раз.

**Взаимосвязь биохимических параметров растений между собой.** Между некоторыми исследуемыми биохимическими показателями растений вариантов П, В<sub>3</sub>, В<sub>2</sub> и В<sub>1</sub> существует тесная взаимосвязь. Значимая прямая корреляция установлена между содержанием антиоксидантов и фенольных соединений в растениях ( $r = 0,95; p < 0,05$ ). Такая высокая корреляционная взаимосвязь, возможно, обусловлена тем, что фенольные соединения являются основными антиоксидантами растительного происхождения. Между содержа-

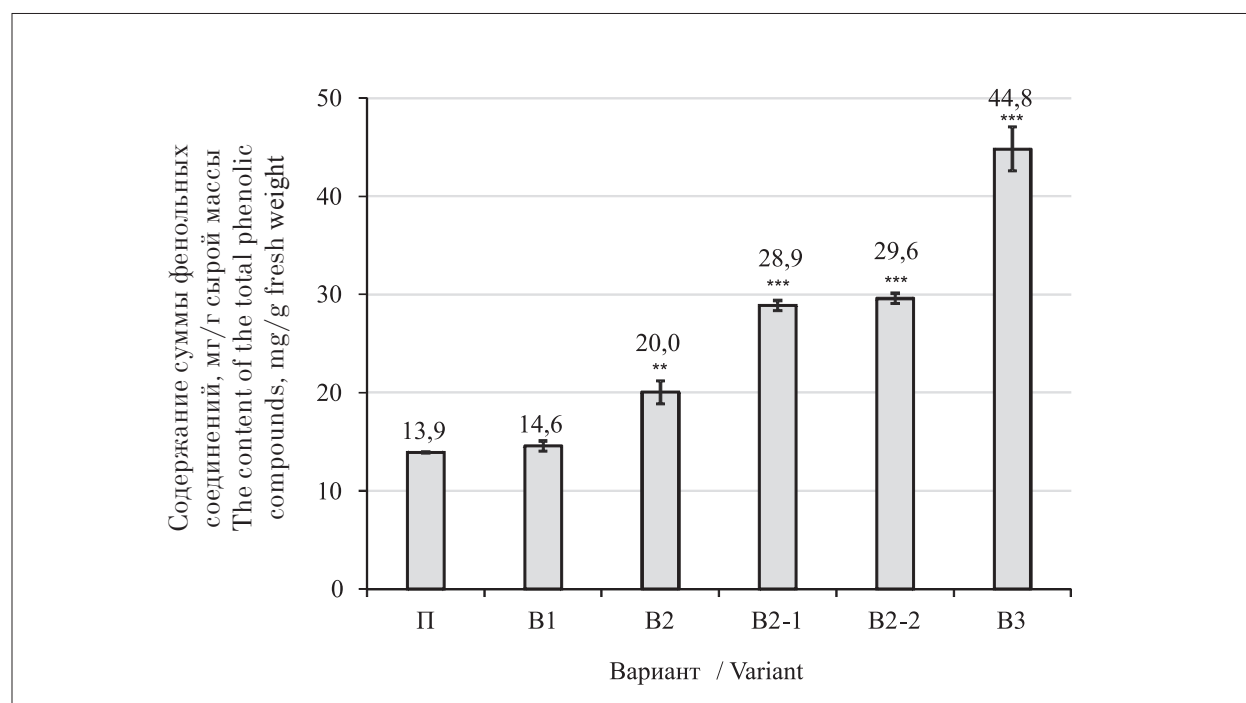


Рис. 2. Содержание суммы фенольных соединений в листьях растений  
 Fig. 2. The content of the amount of phenolic compounds in the leaves of plants

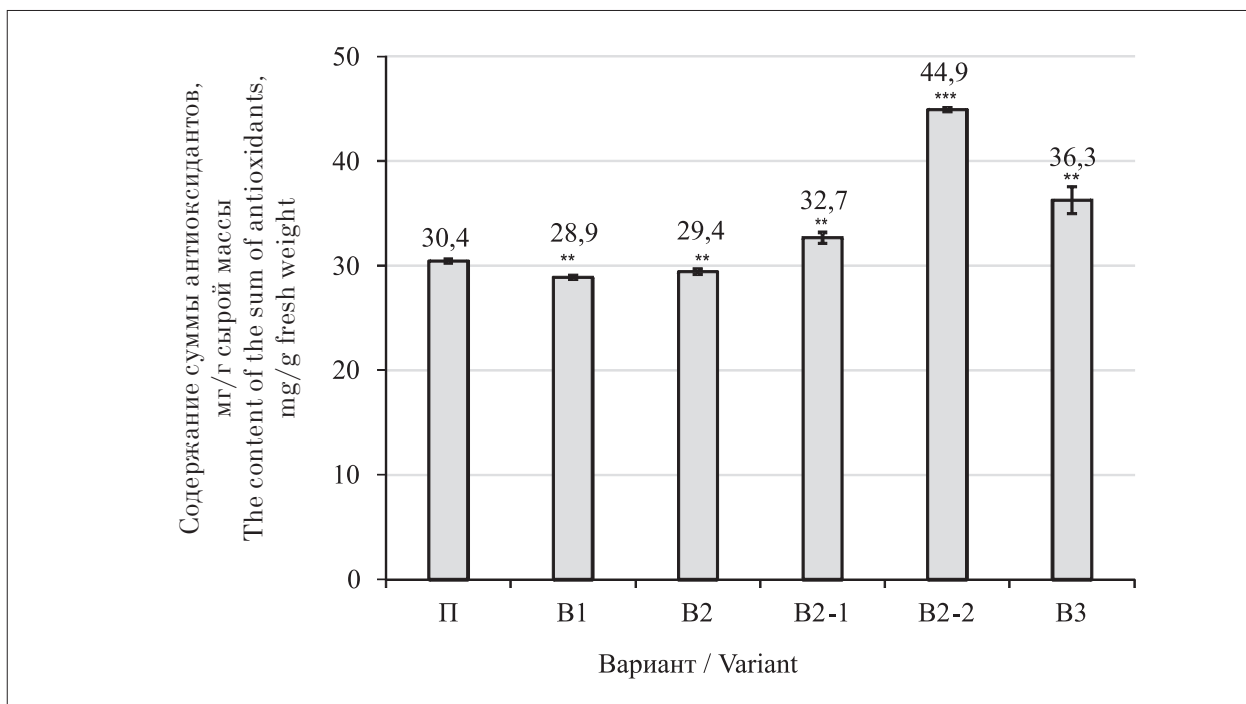


Рис. 3. Содержание суммы антиоксидантов в листьях растений  
 Fig. 3. The content of the amount of antioxidants in the leaves of plants

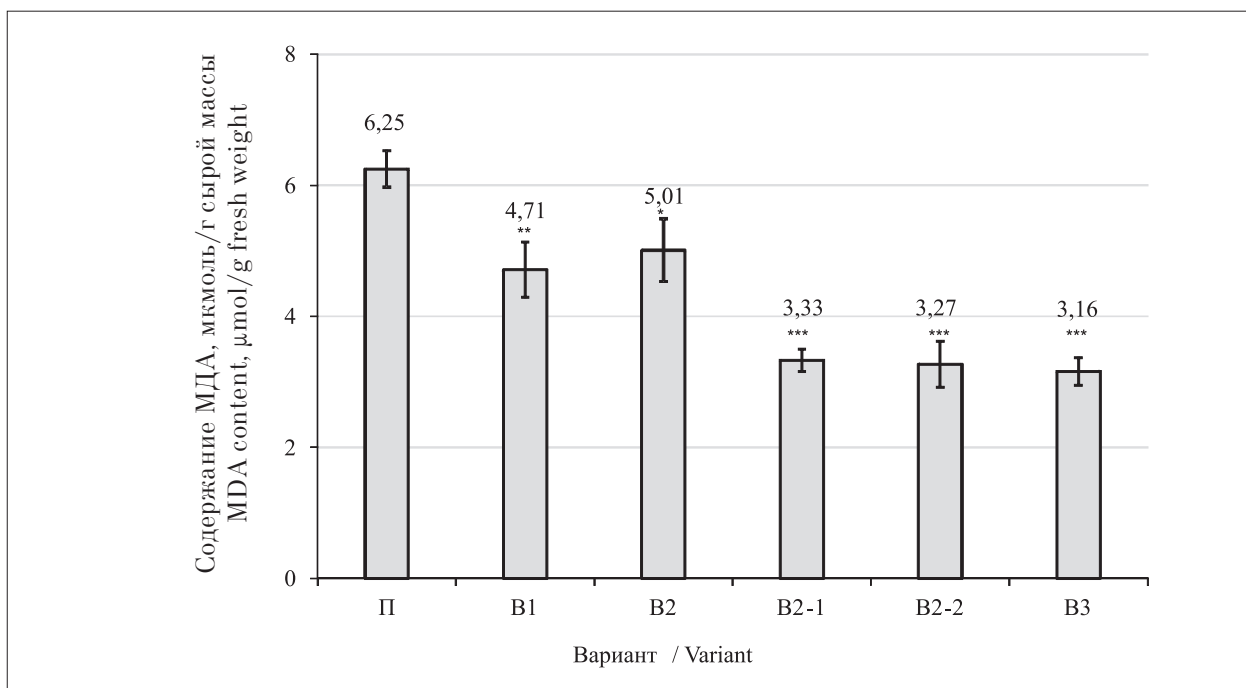


Рис. 4. Содержание малонового диальдегида в листьях растений  
 Fig. 4. The content of malondialdehyde in plant leaves

нием различных фотосинтетических пигментов также существует высокая корреляция ( $r = 0,93-0,99, p < 0,05$ ). Выявлена тенденция к увеличению накопления МДА растениями при уменьшении содержания фенольных соединений и антиоксидантов ( $r = -0,88$  и  $-0,74$ ). Снижение содержания растительных антиокси-

дантов и фенольных соединений, которые способны снизить уровень окислительного стресса, приводит к накоплению МДА растениями.

С увеличением содержания торфа в составе торфосмеси (ряд П → B<sub>3</sub> → B<sub>2</sub> → B<sub>1</sub>) отмечается снижение накопления антиоксидантов и фенольных соединений, увеличение содер-

жания МДА, что свидетельствует об усилении процессов перекисного окисления липидов.

### Заключение

Таким образом, по результатам определения биохимических показателей растений мелиссы лекарственной, выращенных в течение двух месяцев на торфосмесях различного состава, установлено, что по сравнению с использованием чистого торфа и почвы, торфосмеси с следующими соотношениями компонентов: 1 смесь – 1 м. ч. почва + 2 м. ч. песок + 2 м. ч. торф; 2 смесь – 1 м. ч. почва + 3 м. ч. песок + 1 м. ч. торф и внесение удобрения «SOLAR УНИВЕРСАЛ – 18:18:18 + 3MgO + МЭ» благоприятно влияют на накопление биологически активных веществ (фенольных соединений, фотосинтетических пигментов, антиоксидантов) и приводят к снижению содержания маркера окислительного стресса – малонового диальдегида.

За два месяца выращивания под фитолампой и при температуре  $22 \pm 2$  °C в данных вариантах торфосмесей мелисса накапливает достаточно большое количество БАВ: антиоксидантов (до  $44,94 \pm 0,14$  мг/г) и полифенолов ( $44,8 \pm 2,2$  мг/г сырой массы). При этом уровень стресса по сравнению с тем, который наблюдается у мелиссы, выращенной на почве, в 1,9–2,0 раза ниже. В связи с этим данные варианты торфосмесей могут быть рекомендованы к применению в качестве грунтов для выращивания мелиссы лекарственной.

*Работа выполнена в рамках государственного задания ИБ ФИЦ Коми НЦ УрО РАН по теме «Структура и состояние компонентов техногенных экосистем подзоны южной тайги», номер государственной регистрации в ЕГИСУ № 122040100032-5.*

### Литература

1. Jindo K., Sánchez-Monedero M.A., Mastrodonato G., Audette Y., Higashikawa F.S., Silva C.A., Akashi K., Mondini C. Role of biochar in promoting circular economy in the agriculture sector. Part 2: A review of the biochar roles in growing media, composting and as soil amendment // Chem. Biol. Technol. Agric. 2020. V. 7. No. 1. Article No. 16.
2. Петухов Д.В., Измestьев Е.С., Сазанов А.В., Зайцев М.А., Товстик Е.В. Применение аминокислот и их хелатных комплексов с микроэлементами в питании растений (обзор) // Теоретическая и прикладная экология. 2022. № 1. С. 167–174.
3. Moradkhani H., Sargsyan E., Bibak H., Naseri B.,

Sadat-Hosseini M., Fayazi-Barjin A., Meftahizade H. *Melissa officinalis* L., a valuable medicine plant: A review // Journal of Medicinal Plants Research. V. 4. No. 25. P. 2753–2759.

4. Беспалько Л.В., Пинчук Е.В., Ушакова И.Т. Мелисса лекарственная (*Melissa officinalis* L.) – ценная пряно-ароматическая культура // Овощи России. 2019. № 3. С. 57–61.

5. Khallouki F., Breuer A., Akdad M., Laassri F.E., Attaleb M., Elmoulaj B., Mzibri M., Benbacer L., Owen R.W. Cytotoxic activity of Moroccan *Melissa officinalis* leaf extracts and HPLC-ESI-MS analysis of its phytoconstituents // Futur J Pharm Sci. 2020. V. 6. Article No. 20.

6. Teniente S.L., Flores-Gallegos A.C., Esparza-Gonzalez S.C., Campos-Muzquiz L.G., Neri-Flores S.D., Rodriguez-Herrera R. Antitumor effect of pomegranate peel polyphenols against cervical cancer // Antioxidants. 2023. V. 12. No. 1. Article No. 127.

7. Полонский В.И., Лоскутов И.Г., Сумина А.В. Селекция на содержание антиоксидантов в зерне как перспективное направление для получения продуктов здорового питания // Вавиловский журнал генетики и селекции. 2018. Т. 22. № 3. С. 343–352.

8. Perez-Galvez A., Viera I., Roca M. Chemistry in the bioactivity of chlorophylls: an overview // Current Medicinal Chemistry. 2017. V. 24. P. 4515–4536.

9. Фокина А.И., Скугорева С.Г., Трефилова Л.В., Даровских Л.В. Определение показателей окислительного стресса в мелиссе лекарственной при действии микромицета *Fusarium culmorum* и его антагонистов // Теоретическая и прикладная экология. 2022. № 2. С. 77–83.

10. Skugoreva S., Gushchina P., Sharipova Ya., Darovskikh L. Influence of the micromycete *Fusarium culmorum* and its antagonists on the state of the antioxidant system of *Melissa officinalis* L. // Chimica Techno Acta. 2022. V. 9. No. 2S. Article No. 202292S5.

11. Головки Т.К., Силина Е.В., Лашманова Е.А., Козловская А.В. Активные формы кислорода и антиоксиданты в живых системах: интегрирующий обзор // Теоретическая и прикладная экология. 2022. № 1. С. 17–26.

12. Bu X., Ji H., Ma W., Mub Ch., Xianc T., Zhou Zh., Wang F., Xue J. Influence of biochar as a component of a peat-based substrate on the morphological, photosynthetic and biochemical characteristics of *Rhododendron delavayi* Franch // Horticulture Science. 2022. V. 302. Article No. 111148.

13. Shmaefsky B.R., Husen A. Phytoremediation potential of medicinal plants // Medicinal plants – their response to abiotic stress. Singapore: Springer, 2023. P. 443–469.

14. Ranvir R.S., Sahale B.K., Annapur U.S. Microencapsulation of natural pigments // Novel processing methods for plant-based health foods. New York: Apple Academic Press, 2023. P. 163–184.

15. Jaime A., da Silva T., Nazarovets S. Variations in

the naming of malondialdehyde (MDA) in PubMed-, Scopus-, and Web of science-indexed literature // International Journal of Phytoremediation. 2023. V. 25. No. 6. P. 759–764.

16. Князева И.В., Вершинина О.В., Гудимо В.В., Сорокопудов В.Н. Технологические приёмы выращивания мяты и Melissa на вертикальных стеллажах // Вестник Красноярского государственного аграрного университета. 2021. № 11. С. 78–84.

17. Wong L.S., Hashim R., Ali F.H. Strength and permeability of stabilized peat soil // Journal of Applied Sciences. 2008. V. 8. No. 21. P. 3986–3990.

18. Грехова И.В. Гуминовый препарат из низинного торфа // Теоретическая и прикладная экология. 2015. № 1. С. 85–88.

19. Giménez A., Fernández J. A., Pascual J. A., Ros M., López-Serrano M., Egea-Gilabert C. An agroindustrial compost as alternative to peat for production of baby leaf red lettuce in a floating system // Scientia Horticulturae. 2019. V. 246. P. 907–915.

20. Cesonien L., Krikštolaitis R., Daubaras R., Mažeika R. Effects of mixes of peat with different rates of spruce, pine fibers, or perlite on the growth of blueberry saplings // Horticulturae. 2023. V. 9. Article No. 151.

21. Красинская Т.А., Кухарчик Н.В. Основные характеристики субстратов, применяемых в сельском хозяйстве // Плодоводство. 2011. Т. 23. С. 402–419.

22. Walczak R., Rovdan E., Witkowska-Walczak B. Water retention characteristics of peat and sand mixtures // Int. Agrophysic. 2002. V. 16. No. 2. P. 161–165.

23. Максимова Т.В., Никулина И.Н., Пахомов В.П., Шкарина Е.И., Чумакова Э.В., Арзамасцев А.П. Способ определения антиокислительной активности // Патент RU 2170930 С1. Заявка: 2000111126/14, 2000.05.05. Дата публикации: 20.07.2001.

24. Лукаткин А.С., Голованова В.С. Интенсивность перекисного окисления липидов в охлаждённых листьях теплолюбивых растений // Физиология растений. 1988. Т. 35. № 4. С. 773–780.

25. Кудряшов А.П., Дитченко Т.И., Молчан О.В., Смолич И.И., Яковец О.Г. Физиология растений. Минск: БГУ, 2011. 76 с.

26. Миронов В.А., Горячев В.И., Зюзин Б.Ф. Торф в повышении плодородия почв // Труды Института. 2014. № 10 (63). С. 34–39.

27. Блинов И.К., Ипатьев В.А. Содержание закисного и окисного железа в лесных мелиорируемых торфяных почвах // Лесоведение и лесное хозяйство: республиканский межведомственный сборник. Минск: Высшая школа, 1973. Вып. 7. С. 99–102.

28. Tang Ch., Chen Y., Zhang Q., Li J., Zhang F., Liu Zh. Effects of peat on plant growth and lead and zinc phytostabilization from lead-zinc mine tailing in southern China: Screening plant species resisting and accumulating metals // Ecotoxicology and Environmental Safety. 2019. V. 176. P. 42–49.

29. Nwozo O.S., Effiong E.M., Aja P.M., Awuchi Ch.G.

Antioxidant, phytochemical and therapeutic properties of medicinal plants: a review // International Journal of Food Properties. 2023. V. 26. No. 1. P. 359–388.

## References

1. Jindo K., Sánchez-Monedero M.A., Mastrodonato G., Audette Y., Higashikawa F.S., Silva C.A., Akashi K., Mondini C. Role of biochar in promoting circular economy in the agriculture sector. Part 2: A review of the biochar roles in growing media, composting and as soil amendment // Chem. Biol. Technol. Agric. 2020. V. 7. No. 1. Article No. 16. doi: 10.1186/s40538-020-00179-3

2. Petukhov D.V., Izmet'ev E.S., Sazanov A.V., Zaitsev M.A., Tovstik E.V. The use of amino acids and their chelate complexes with trace elements in plant nutrition (review) // Theoretical and Applied Ecology. 2022. No. 1. P. 167–174 (in Russian). doi: 10.25750/1995-4301-2022-1-167-174

3. Moradkhani H., Sargsyan E., Bibak H., Naseri B., Sadat-Hosseini M., Fayazi-Barjin A., Meftahizade H. *Melissa officinalis* L., a valuable medicine plant: A review // Journal of Medicinal Plants Research. V. 4. No. 25. P. 2753–2759.

4. Bepalko L.V., Pinchuk E.V., Ushakova I.T. *Melissa officinalis* L. is a valuable spicy-aromatic crop // Ovoshchi Rossii. 2019. No. 3. P. 57–61 (in Russian). doi: 10.18619/2072-9146-2019-3-57-61

5. Khallouki F., Breuer A., Akdad M., Laassri F.E., Attaleb M., Elmoualij B., Mzibri M., Benbacer L., Owen R.W. Cytotoxic activity of Moroccan *Melissa officinalis* leaf extracts and HPLC-ESI-MS analysis of its phytoconstituents // Futur J Pharm Sci. 2020. V. 6. No. 20. doi: 10.1186/s43094-020-00037-x

6. Teniente S.L., Flores-Gallegos A.C., Esparza-Gonzalez S.C., Campos-Muzquiz L.G., Neri-Flores S.D., Rodriguez-Herrera R. Antitumor effect of pomegranate peel polyphenols against cervical cancer // Antioxidants. 2023. V. 12. No. 1. Article No. 127. doi: 10.3390/antiox12010127

7. Polonsky V.I., Loskutov I.G., Sumina A.V. Breeding for the content of antioxidants in grain as a promising direction for obtaining healthy foods // Vavilov Journal of Genetics and Breeding. 2018. V. 22. No. 3. P. 343–352 (in Russian). doi: 10.18699/VJ18.370

8. Perez-Galvez A., Viera I., Roca M. Chemistry in the bioactivity of chlorophylls: an overview // Current Medicinal Chemistry. 2017. V. 24. P. 4515–4536. doi: 10.2174/0929867324666170714102619

9. Fokina A.I., Skugoreva S.G., Trefilova L.V., Darovskikh L.V. Determination of oxidative stress indicators in *Melissa officinalis* under the action of micromycete *Fusarium culmorum* and its antagonists // Theoretical and Applied Ecology. 2022. No. 2. P. 77–83 (in Russian). doi: 10.25750/1995-4301-2022-2-077-083

10. Skugoreva S., Gushchina P., Sharipova Ya.,

- Darovskikh L. Influence of the micromycete *Fusarium culmorum* and its antagonists on the state of the antioxidant system of *Melissa officinalis* L. // *Chimica Techno Acta*. 2022. V. 9. No. 2S. Article No. 202292S5. doi: 10.15826/chimtech.2022.9.2.S5
11. Golovko T.K., Silina E.V., Lashmanova E.A., Kozlovskaya A.V. Reactive oxygen species and antioxidants in living systems: an integrated overview // *Theoretical and Applied Ecology*. 2022. No. 1. P. 17–26 (in Russian). doi: 10.25750/1995-4301-2022-1-017-026
12. Bu X., Ji H., Ma W., Mub Ch., Xianc T., Zhou Zh., Wang F., Xue J. Influence of biochar as a component of a peat-based substrate on the morphological, photosynthetic and biochemical characteristics of *Rhododendron delavayi* Franch // *Horticulture Science*. 2022. V. 302. Article No. 111148. doi: 10.1016/j.scienta.2022.111148
13. Shmaefsky B.R., Husen A. Phytoremediation potential of medicinal plants // *Medicinal plants – their response to abiotic stress*. Singapore: Springer, 2023. P. 443–469.
14. Ranvir R.S., Sahale B.K., Annapur U.S. Microencapsulation of natural pigments // *Novel Processing Methods for Plant-Based Health Foods*. New York: Apple Academic Press, 2023. P. 163–184.
15. Jaime A., da Silva T., Nazarovets S. Variations in the naming of malondialdehyde (MDA) in PubMed-, Scopus-, and Web of science-indexed literature // *International Journal of Phytoremediation*. 2023. V. 25. No. 6. P. 759–764. doi: 10.1080/15226514.2022.2106184
16. Knyazeva I.V., Vershinina O.V., Gudimo V.V., Sorokopudov V.N. Technological methods of growing mint and lemon balm on vertical racks // *Bulletin of KrasSAU*. 2021. No. 11. P. 78–84 (in Russian).
17. Wong L.S., Hashim R., Ali F.H. Strength and permeability of stabilized peat soil // *Journal of Applied Sciences*. 2008. V. 8. No. 21. P. 3986–3990. doi: 10.3923/jas.2008.3986.3990
18. Grekhova I.V. Humic preparation of lowland peat // *Theoretical and Applied Ecology*. 2015. No. 1. P. 85–88 (in Russian). doi: 10.25750/1995-4301-2015-1-087-090
19. Giménez A., Fernández J. A., Pascual J. A., Ros M., López-Serrano M., Egea-Gilabert C. An agroindustrial compost as alternative to peat for production of baby leaf red lettuce in a floating system // *Scientia Horticulturae*. 2019. V. 246. P. 907–915. doi: 10.1016/j.scienta.2018.11.080
20. Cesonien L., Krikštolaitis R., Daubaras R., Mažeika R. Effects of mixes of peat with different rates of spruce, pine fibers, or perlite on the growth of blueberry saplings // *Horticulturae*. 2023. V. 9. Article No. 151. doi: 10.3390/horticulturae9020151
21. Krasinskaya T.A., Kukharchik N.V. The main characteristics of substrates used in agriculture // *Plodovodstvo*. 2011. V. 23. P. 402–419 (in Russian).
22. Walczak R., Rovdan E., Witkowska-Walczak B. Water retention characteristics of peat and sand mixtures // *Int. Agrophysic*. 2002. V. 16. No. 2. P. 161–165.
23. Maksimova T.V., Nikulina I.N., Pakhomov V.P., Shkarina E.I., Chumakova Z.V., Arzamastsev A.P. Method for determining antioxidant activity // Patent RU 2170930 C1. Application: 2000111126/14, 2000.05.05. Date of publication: 20.07.2001 (in Russian).
24. Lukatkin A.S., Golovanova V.S. Intensity of lipid peroxidation in chilled leaves of heat-loving plants // *Plant Physiology*. 1988. V. 35. No. 4. P. 773–780 (in Russian).
25. Kudryashov A.P., Ditchenko T.I., Molchan O.V., Smolich I.I., Yakovets O.G. *Physiology of plants*. Minsk: BGU, 2011. 76 p. (in Russian).
26. Mironov V.A., Goryachev V.I., Zyuzin B.F. Peat in improving soil fertility // *Trudy Instorfa*. 2014. No. 10 (63). P. 34–39 (in Russian).
27. Blintsov I.K., Ipatiev V.A. The content of ferrous and oxide iron in forest reclaimed peat soils // *Forest science and forestry: republican interdepartmental collection*. Minsk: Vysshaya shkola, 1973. V. 7. P. 99–102.
28. Tang Ch., Chen Y., Zhang Q., Li J., Zhang F., Liu Zh. Effects of peat on plant growth and lead and zinc phytostabilization from lead-zinc mine tailing in southern China: Screening plant species resisting and accumulating metals // *Ecotoxicology and Environmental Safety*. 2019. V. 176. P. 42–49. doi: 10.1016/j.ecoenv.2019.03.078
29. Nwozo O.S., Effiong E.M., Aja P.M., Awuchi Ch.G. Antioxidant, phytochemical and therapeutic properties of medicinal plants: a review // *International Journal of Food Properties*. 2023. V. 26. No. 1. P. 359–388. doi: 10.1080/10942912.2022.2157425

## Пространственно-временной анализ влажности почв сельскохозяйственных полей

© 2023. Д. С. Фомин<sup>1</sup>, к. с.-х. н., зав. лабораторией,  
А. Н. Чашчин<sup>2</sup>, к. б. н., доцент,

<sup>1</sup>Пермский федеральный исследовательский центр  
Уральского отделения Российской академии наук,  
614990, Россия, г. Пермь, ул. Ленина, д. 13,

<sup>2</sup>Пермский государственный аграрно-технологический университет  
имени академика Д. Н. Прянишникова,  
614990, Россия, г. Пермь, ул. Петропавловская, д. 23,  
e-mail: chascshin@mail.ru

Проведены исследования пространственно-временной изменчивости полевой влажности почв трёх опытных полей ПФИЦ УрО РАН, расположенных в Пермском районе Пермского края (с. Лобаново). Условия опыта – чистый пар. Полевую влажность почв измеряли по точкам, расставленным с учётом неоднородности почвенного покрова и условий рельефа. На основе выполненных измерений созданы карты полевой влажности почв геостатистическим методом Ordinary Kriging. На основе полученных геостатистических слоёв была установлена взаимосвязь влажности со спутниковыми данными Sentinel 2 через спектральный индекс NDVI. Характер зависимости оказался изменчив во времени. В начале вегетационного периода зависимость является обратной, что подтверждает индикационную роль NDVI при выявлении переувлажнённых участков, но, начиная с третьей декады мая, связь становится положительной. Это объясняется тем, что обработка чистых паров производится не ежедневно и на участках, имеющих наибольшее увлажнение, раньше появляются всходы. Поэтому в течение вегетационного периода полевая влажность через NDVI идентифицируется косвенно – по величине биомассы растений. Для отдельных дат измерений установлена тесная корреляционная связь растровых карт NDVI и полевой влажности ( $r = 0,86$ ). Полученная зависимость может применяться при прогнозировании влажности почв аналогичных территорий. Результаты исследований будут использованы для дифференцированного посева семян с учётом различных условий увлажнения в пределах опытных полей.

**Ключевые слова:** полевая влажность почвы, ординарный кригинг, вегетационный индекс NDVI, точное земледелие.

## Spatio-temporal analysis of soil moisture in the experimental agricultural fields

© 2023. D. S. Fomin<sup>1</sup> ORCID: 0000-0001-8261-7191<sup>?</sup>  
A. N. Chashchin<sup>2</sup> ORCID: 0000-0002-6349-3055<sup>?</sup>

<sup>1</sup>Perm Federal Research Center of the Ural Branch  
of the Russian Academy of Sciences,  
13, Lenina St., Perm, Russia, 614990,

<sup>2</sup>Perm State Agro-Technological University  
named after Academician D. N. Pryanishnikov,  
23, Petropavlovskaya St., Perm, Russia, 614990,  
e-mail: chascshin@mail.ru

Studies of the spatial-temporal variability of the field soil moisture content of three experimental fields located in the Perm district of the Perm region were carried out. The experimental conditions were pure fallow. The purpose of the work is to perform a spatio-temporal analysis of soil moisture in experimental fields using mathematical-cartographic and remote sensing methods. Field soil moisture was measured by points placed taking into account the heterogeneity of the soil cover and topography conditions. Based on the measurements performed, maps of field soil moisture were created using the “Ordinary Kriging” geostatistical method, using the Geostatistical Analyst module of the ArcGIS 10.1 program. The assessment of the influence of the relief on the moisture was performed using the SRTM global digital elevation model. Indicators calculated were topographic humidity index and closed depressions. Based on the obtained geostatistical layers, the relationship between humidity and Sentinel 2 satellite data was established through the spectral index NDVI. For the initial and final dates of measurements, correlation coefficients 0.8 and 0.9 were obtained. The nature of dependence turned out to be changeable over



time. At the beginning of the growing season, the relationship is inverse, which confirms the indicator role of NDVI in moist areas, but starting from the third decade of May, the relationship becomes positive. This is due to the fact that the treatment of soils is not done every day, and seedlings appear earlier in the areas with the greatest moisture. Therefore, during the growing season, the field moisture content through the NDVI is indirectly identified by the value of the plant biomass. For individual measurement dates, a close correlation was established between NDVI raster maps and field humidity ( $r = 0.86$ ). The resulting dependence can be used to predict soil moisture in similar areas. The results of the research will be used for differentiated sowing of seeds, taking into account different moisture conditions within the experimental fields.

**Keywords:** soil moisture, Ordinary Kriging, Normalized Difference Vegetation Index, precision farming.

Влажность почвы служит одним из основных параметров в системе точного земледелия. Этот показатель применяется для определения оптимальных условий роста на различных участках поля, прогнозирования урожайности и определения проблемных зон, обусловленных рельефом. Полевая влажность почвы является динамическим показателем и зависит от ряда факторов, имеющих пространственную неоднородность [1–3]. Пространственная неоднородность почвенной влажности значительно усиливается в условиях сложного рельефа и пестроты почвенного покрова Пермского края. Поэтому даже на небольших площадях опытных полей влажность почвы может варьировать в значимом диапазоне. Результаты исследований пространственно-временной динамики полевой влажности преобладающих типов почв южно-таёжной подзоны региона позволяют создать геодинамическую модель прогноза значимых для растениеводства показателей: наступление срока физической спелости почвы, риски гибели посевов от избыточного переувлажнения или засух, что определяет актуальность выполненных исследований. При этом прогноз осуществляется на конкретную дату, поскольку в основе моделей используются данные дистанционного зондирования, которые чётко отражают процессы перемещения воды в поверхностном слое открытых почв [4]. На свободной от растительности земной поверхности это показатель полевой влажности, который, согласно данным [5, 6], является значимым экологическим параметром почв. Угодьями с открытой поверхностью почв в течение всего вегетационного периода являются чистые пары. В связи с этим исследования проведены на чистых парах опытных полей ПФИЦ УрО РАН.

Цель работы – выполнить пространственно-временной анализ влажности почв опытных полей с использованием математико-картографических и дистанционных методов.

### Объекты и методы исследований

Объектом исследований является почвенный покров трёх опытных полей ПФИЦ УрО

РАН, расположенных в с. Лобаново Пермского района Пермского края (рис. 1).

Несмотря на близкое расположение, почвенный покров полей значительно отличается. Также различны условия рельефа, что определяет различные условия увлажнения. Общая площадь исследований составляет 26,7 га (поле 1 – 10,8; поле 2 – 12,5; поле 3 – 3,4 га). Места заложения участков измерений полевой влажности почв выбраны на различных почвенных контурах и элементах рельефа. Почвенный покров поля 1 является наиболее разнообразным. Преобладающая почва – дерново-слабоподзолистая среднесмытая (60% от площади). На поле заложено 11 точек: 2 – на дерново-бурой почве, 5 и 3 – на дерново-подзолистой средне- и слабосмытой соответственно. Почвенный покров второго поля охватывает две почвенные разности: дерновую среднегумусную (65% от площади) и дерново-мелкоподзолистую (35% от площади). Всего заложено 7 точек: 3 – на дерновой почве и 4 – на дерново-подзолистой. Почвенный покров третьего поля представлен только одной почвенной разностью – дерново-мелкоподзолистой. Поэтому выбор местоположения точек измерения полевой влажности выполнен с учётом рельефа. Всего на поле выбрано 10 точек. Таким образом, пространственно-временной анализ влажности почв выполнен на основе 28 точек измерений на трёх полях с разной контрастностью почвенного покрова и формами рельефа, при этом типы почв являются наиболее характерными для южно-таёжной подзоны Пермского края.

Полевую влажность почв [7] измеряли в трёхкратной повторности прибором «Измеритель влажности почвы «Moisture Meter НН2». В связи с неблагоприятными метеоусловиями (облачность и избыточное количество осадков) измерения удалось провести только по датам: 19 апреля, 11 мая, 5 июня, 18 июля 2019 г. Масштаб съёмки детальный – 1 : 5000. Предварительный анализ данных полевой влажности и интерполяция методом Ordinary Kriging проведены средствами модуля Geostatistical Analyst программы ArcGIS 10.1 [8]. Создание

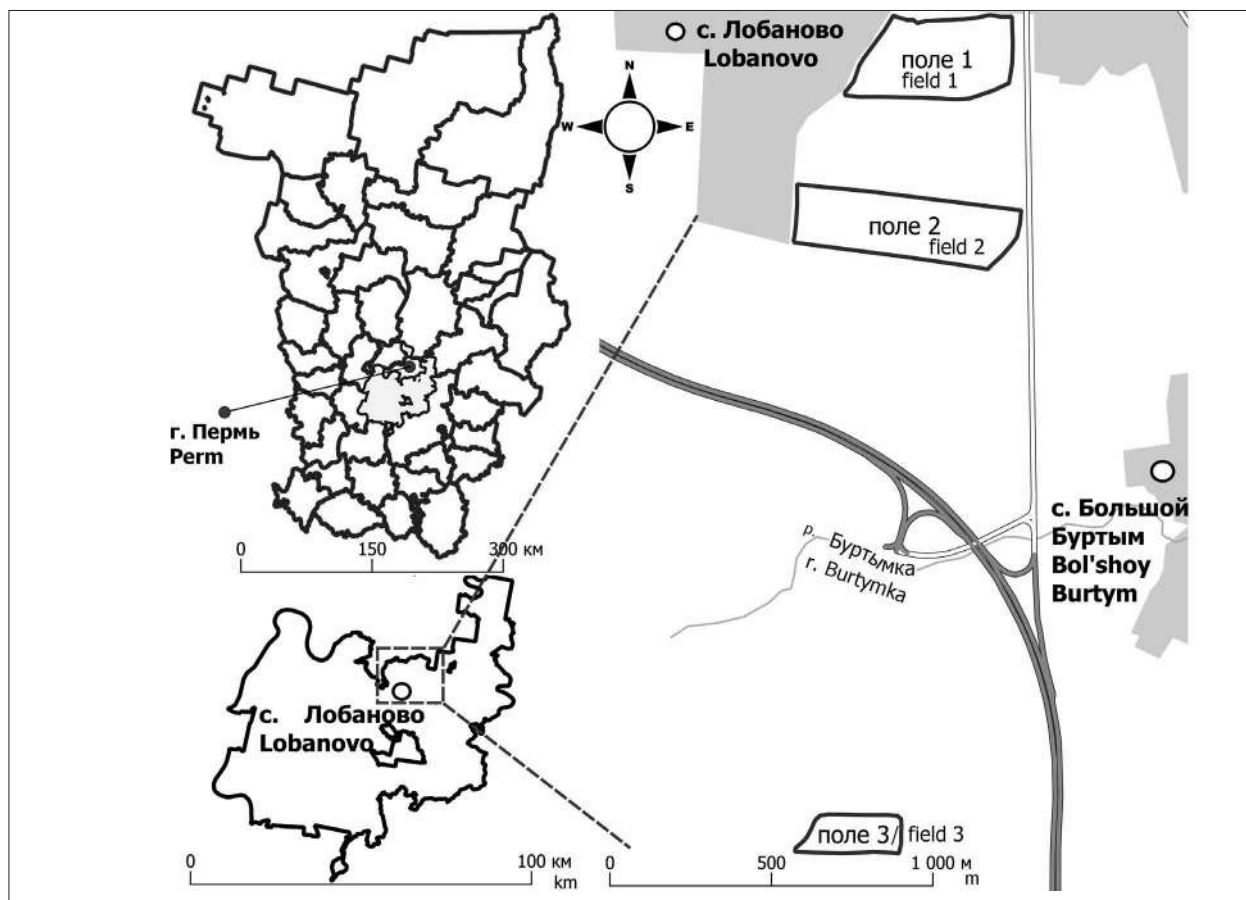


Рис. 1. Расположение опытных полей на территории Пермского края  
 Fig. 1. Location of experimental fields in the Perm region

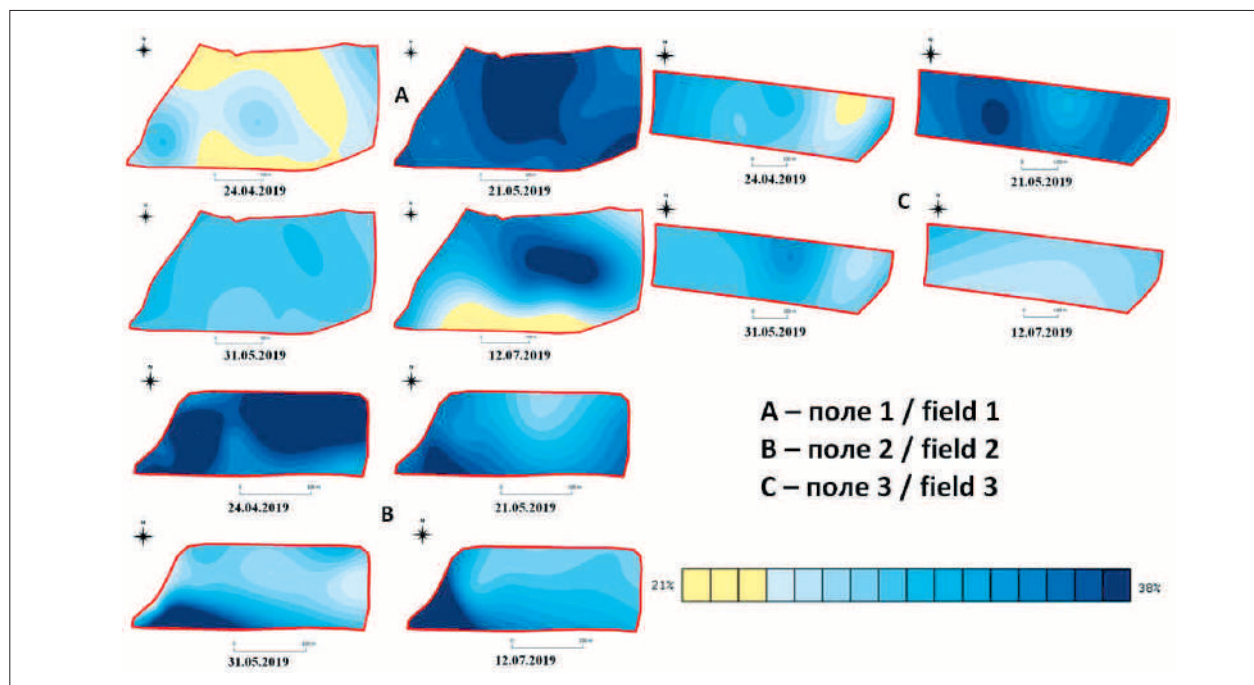
картографических материалов и обработку спутниковых снимков выполняли в программном продукте QGIS. В качестве данных дистанционного зондирования использовали мультиспектральные снимки сенсора Sentinel 2 с пространственным разрешением 10 м на пиксель. Оценка влияния рельефа на полевую влажность выполнена при помощи глобальной цифровой модели рельефа SRTM. Рассчитаны показатели: топографический индекс влажности и замкнутые понижения. Для создания прогнозных моделей оценки влагообеспеченности почв и растений использовали спектральный вегетационный индекс NDVI (Normalized Difference Vegetation Index) [9, 10].

### Результаты и обсуждение

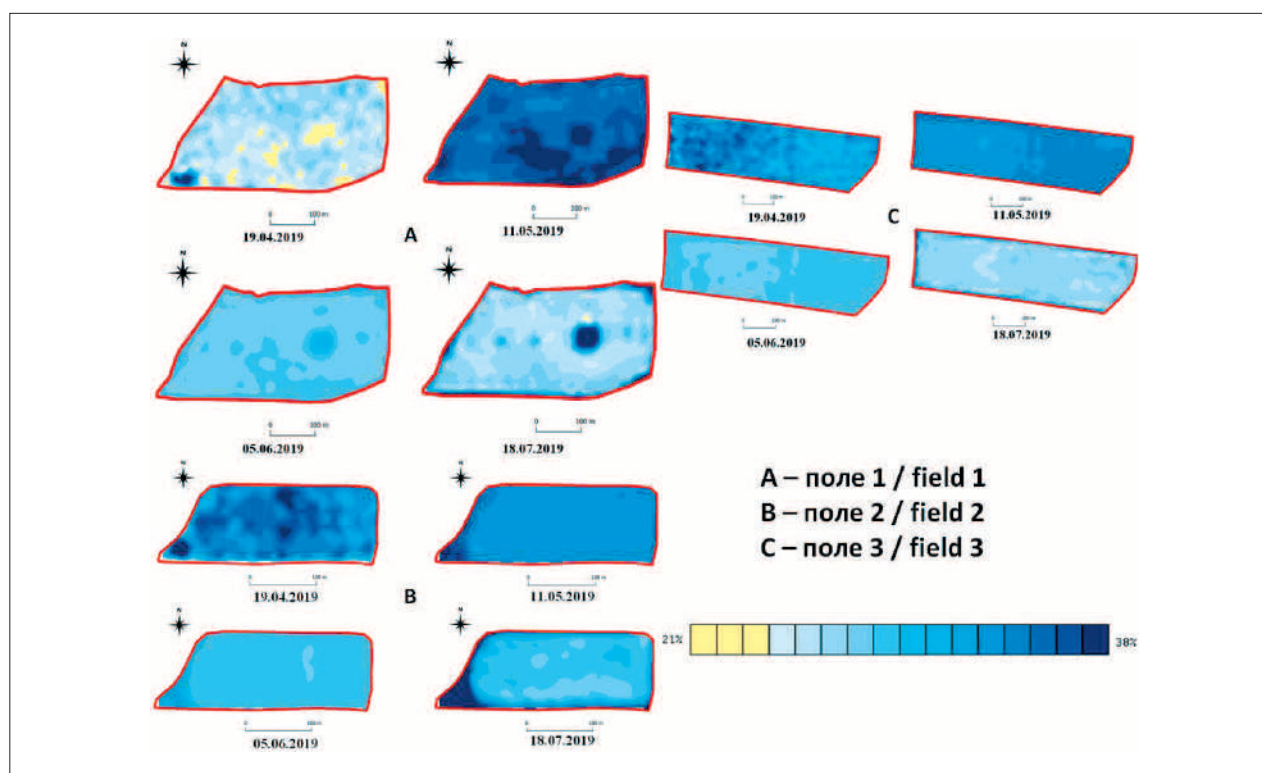
В результате исследования данных о влажности почвы трёх опытных полей подобраны оптимальные параметры интерполяции методом Ordinary Kriging. Результаты картографирования показаны на рисунке 2 (см. цв. вкладку VI). Математико-картографическое моделирование полевой влажности на поле 1

позволило выявить участки, наиболее быстро просыхающие после схода снежного покрова (24 апреля). В дальнейшем рост поверхностного увлажнения к 21 мая вызван атмосферными осадками. Ареалы повышенных значений топографического индекса влажности имеют совпадения с полевой влажностью только 21 мая. На поле 2 динамика полевой влажности аналогична – происходит увлечение поверхностного увлажнения к 21 мая и снижение – 12 июля. Колебания полевой влажности в вегетационный период обусловлены атмосферными осадками. Области высоких значений топографического индекса влажности и замкнутых понижений соответствуют полевой влажности почвы 21 апреля, что свидетельствует о значительном влиянии рельефа на динамику поверхностного увлажнения почвы от талых вод. По результатам пространственной интерполяции влажности почвы на третьем поле выделена область максимального переувлажнения в юго-западной части, где на каждую дату наблюдений видны наибольшие значения. При этом в среднем динамика влажности поля в пространстве

**Д. С. Фомин, А. Н. Чашин**  
**«Пространственно-временной анализ влажности почв**  
**сельскохозяйственных полей». С. 113.**



**Рис. 2.** Полевая влажность почвы на полях  
**Fig. 2.** Soil moisture in the fields



**Рис. 4.** Пространственно-временная модель влажности почв полей  
**Fig. 4.** Spatio-temporal model of soil moisture in the fields

и времени свидетельствует об увеличении влажности от севера к югу участка.

Отражение открытой почвы в условиях чистого пара фиксируют спутниковые снимки. По данным таблицы 1 наибольшее влияние влажность почвы оказывает на индекс NDVI. Выявленная взаимосвязь была использована для моделирования и пространственно-временного анализа полевой влажности почв опытных полей. Характер зависимости оказался изменчив во времени (табл. 1). В начале вегетационного периода зависимость является обратной, что подтверждает индикационную роль NDVI при выявлении переувлажнённых участков, поскольку данный вегетационный индекс имеет для воды отрицательные значения и по данным [11] находится в диапазоне от -1 до 0. Но начиная с третьей декады мая, связь становится положительной. Это объясняется тем, что обработка чистых паров производится не ежедневно и на участках, имеющих

наибольшее увлажнение, раньше появляются всходы растений. Поэтому в течение вегетационного периода полевая влажность через NDVI идентифицируется косвенно – по уровню вегетации.

Даты измерения полевой влажности и получения данных дистанционного зондирования имеют определённые различия. Периодичность съёмки сенсора Sentinel 2 в средних широтах северного полушария составляет 1 раз в 2–3 суток [12]. Однако вегетационный период 2019 г. характеризовался аномально низким числом безоблачных дней, что значительно ограничило количество снимков. Поэтому интервал полевых измерений и отображения спектральной отражательной способности почвы колеблется от 5 до 10 дней. Даты данных – наземные измерения (космические снимки) были следующие: 24.04.2019 (19.04.2019); 21.05.2019 (11.05.2019); 31.05.2019 (05.06.2019); 12.07.2019 (18.07.2019).

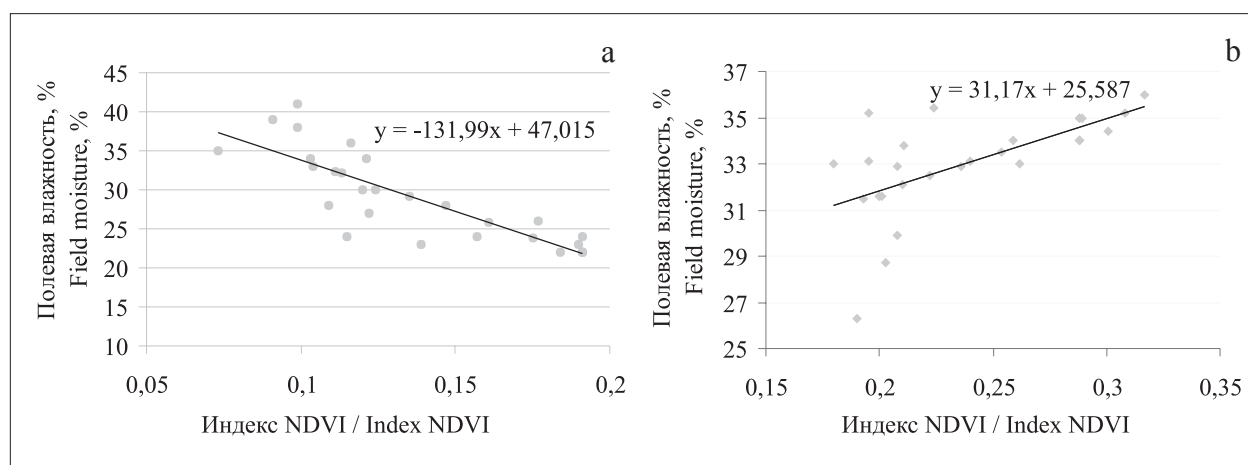


Рис. 3. Графики зависимости значений NDVI от величины полевой влажности 24 апреля 2019 (a) и 21 мая 2019 (b)

Fig. 3. Graphs of NDVI versus humidity on 04.24.2019 (a) and 05.21.2019 (b)

Таблица 1 / Table 1

Коэффициенты корреляции между полевой влажностью почвы и показателями дистанционного зондирования Земли / Correlation coefficients of soil moisture and ERS indicators

Показатель / Parameter		Даты полевых измерений / Dates of field measurements			
		24.04.2019	21.05.2019	31.05.2019	12.07.2019
NDVI		-0,8	0,6	0,4	0,9
Каналы сенсора Sentinel-2 Sentinel-2 bands	NIR	-0,1	0,2	0,2	0,1
	RED	0,0	0,1	-0,1	0,1
	GREEN	0,2	0,1	0,1	0,1
	BLUE	0,1	-0,1	0,1	0,2
Результаты переклассификации данных ЦМР DEM reclassification	TWI	0,1	0,1	0,3	-0,1
	closed depressions	0,1	0,1	0,2	-0,1

Примечания: TWI – топографический индекс влажности; closed depressions – закрытые понижения.  
Note: TWI – topographic moisture index; closed depressions – drainless depressions.

Таблица 2 / Table 2  
 Уравнения регрессионных зависимостей полевой влажности ( $y$ ) и NDVI ( $x$ )  
 Regression equations describing the relationship between field moisture ( $y$ ) and NDVI ( $x$ )

Дата Date	Уравнение связи Relationship equation	Коэффициент детерминации, $R^2$ Determination coefficient, $R^2$
24.04.2019	$y = -131,9x + 47,01$	0,703
12.07.2019	$y = 57,05x + 11,93$	0,892

Для описания зависимости NDVI от полевой влажности были построены графики зависимости значений NDVI от полевой влажности (рис. 3).

По мере увеличения полевой влажности в начале периода наблюдений значения NDVI располагаются более рассеянно на графиках, а с наступлением вегетационного периода, при смене зависимости с обратной на прямую, значения NDVI располагаются более компактно вокруг линии регрессии.

Из таблицы 2 видно, что наибольшим коэффициентом детерминации характеризуется уравнение на дату 12 июля. Рассчитанные уравнения связи использованы для создания прогнозных моделей полевой влажности почвы.

Результаты пространственно-временного моделирования представлены в виде картосхем полевой влажности (рис. 4, см. цв. вкладку VI). На первом поле области переувлажнения в апреле не имеют концентрических очертаний как по результатам полевых измерений, но в целом выделяется переувлажнённый участок в юго-западной части. Участки почв с влажностью менее 25% также имеют схожие местоположения. Динамика полевой влажности поля 2 в целом соответствует общему изменению во времени, однако участки переувлажнённых почв и почв, имеющих влажность до 25%, различны.

Данные расхождения обусловлены началом вегетации, когда при недостаточной сумме температур на переувлажнённых участках всходы вымокают и зависимость NDVI от влажности почвы снижается. Прогноз полевой влажности поля 3 свидетельствует о наибольшем сходстве ( $r = 0,86$ ) с результатами полевых измерений, проведённых 12.07.2019. Это также подтверждает самый высокий коэффициент детерминации уравнения связи. В июльский период температура меньше лимитирует появление всходов на чистом пару и по границам всходов можно установить участки повышенной влажности почвы, что также согласуется с ранее опубликованными результатами исследований [13–20].

## Заключение

Анализ экспериментальных данных, полученных за вегетационный период 2019 г., позволил выявить влияние полевой влажности почвы на NDVI. Для отдельных дат измерений установлена тесная корреляция между влажностью почвы и NDVI посевов ( $r = 0,86$ ). Полученная зависимость может применяться за счёт включения данных в математические модели при прогнозировании влажности почв аналогичных территорий и для дифференцированного посева семян в системе прецизионного земледелия с учётом различных условий увлажнения. По картам влажности может осуществляться корректировка норм высева семян. Дифференцированный посев производится современными сельскохозяйственными машинами (марки сеялок: JohnDeere, Challenger, Monosem, Matter MacWhite, Kinze, Great Plains), управляемыми бортовым компьютером на тракторе. Перед проведением дифференцированного посева карты влажности трансформируются в карты-задания и загружаются в специальное программное обеспечение (например, «Agrar-Office») в формате шейп-файла, содержащего участки с атрибутами рекомендуемых норм высева. На основе этих пространственных данных при работе в поле в соответствии с местоположением, определяемым с помощью навигационной системы, автоматически регулируется количество семян. У дифференцированного посева есть два преимущества – увеличение урожайности и экономия семян. Экологические выгоды увеличения урожайности обусловлены сокращением нагрузки на агроэкосистему за счёт снижения объёмов применения минеральных удобрений и средств защиты растений.

Таким образом, достижение поставленной цели исследований даёт понимание методологии применения данных дистанционного зондирования с учётом сезонных особенностей связи вегетационного индекса и полевой влажности: после весеннего снеготаяния зависимость обратная, а в период активной вегетации сельскохозяйственных культур – прямая.

## Литература

1. Sandholt I., Rasmussen K., Anderson J. A simple interpretation of the surface temperature/vegetation index space for assessment of the surface moisture status // *Remote Sensing of Environment*. 2002. V. 79. P. 213–224.
2. Trinh L.H. Application of LANDSAT thermal infrared data to study soil moisture using temperature vegetation dryness index // *Vietnam J. Earth Sciences*. 2014. V. 36. No. 3. P. 262–270.
3. Wan Z., Wang P., Li X. Using MODIS land surface temperature and normalized difference vegetation index products for monitoring drought in the southern Great Plains, USA // *Intern. J. Remote Sensing*. 2004. V. 25. No. 1. P. 61–72.
4. Зверев А.Т., Чинь Л.Х. Мониторинг влажности почвы по данным многозональной съёмки Landsat // *Исследование Земли из космоса*. 2015. № 6. С. 62–67.
5. Karavani A., De Cáceres M., De Aragón J.M., Bonet J.A., De-Miguel S. Effect of climatic and soil moisture conditions on mushroom productivity and related ecosystem services in Mediterranean pine stands facing climate change // *Agricultural and Forest Meteorology*. 2018. V. 248. P. 432–440.
6. Тус О., Song C., Dickschat J.S., Vos M., Garbeva P. The ecological role of volatile and soluble secondary metabolites produced by soil bacteria // *Trends in Microbiology*. 2017. V. 25. No. 4. P. 280–292.
7. Вадюнина А.Ф., Корчагина З.А. Методы исследования физических свойств почв. М.: Агропромиздат, 1986. 416 с.
8. Демьянов В.В. Геостатистика: теория и практика. М.: Наука, 2010. 327 с.
9. Йерена С., Тоаса Г., Курбатова А.И. Соотношение NDVI и альфа-разнообразия в тропических влажных горных лесах Эквадора // *Теоретическая и прикладная экология*. 2022. № 3. С. 58–67. doi: 10.25750/1995-4301-2022-3-058-067
10. Chen T., De Jeu R.A.M., Liu Y.Y., van der Werf G.R., Dolman A.J. Using satellite based soil moisture to quantify the water driven variability in NDVI // *Remote Sensing of Environment*. 2014. V. 140. P. 330–338.
11. Кутявина Т.И., Рутман В.В., Ашихмина Т.Я., Савиных В.П. Использование космических снимков для определения границ водоёмов и изучения процессов эвтрофикации // *Теоретическая и прикладная экология*. 2019. № 3. С. 28–33.
12. Шихов А.Н., Герасимов А.П., Пономарчук А.И., Перминова Е.С. Тематическое дешифрирование и интерпретация космических снимков среднего и высокого пространственного разрешения. Пермь: ПГНИУ, 2020. 191 с.
13. Sharma M., Bangotra P., Gautam A.S., Gautam S. Sensitivity of normalized difference vegetation index (NDVI) to land surface temperature, soil moisture and precipitation over district Gautam Buddh Nagar, UP, India // *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment*. 2022. V. 36. No. 6. P. 1779–1789.
14. Joiner J., Yoshida Y., Anderson M., Holmes T., Hain C., Reichle R., Zeng F.W. Global relationships among traditional reflectance vegetation indices (NDVI and NDII), evapotranspiration (ET), and soil moisture variability on weekly timescales // *Remote Sensing of Environment*. 2018. V. 219. P. 339–352.
15. Carlson T.N., Perry E.M., Schmugge T.J. Remote estimation of soil moisture availability and fractional vegetation cover for agricultural fields // *Agricultural and Forest Meteorology*. 1990. V. 52. No. 1–2. P. 45–69.
16. Chauhan N.S., Miller S., Ardanuy P. Spaceborne soil moisture estimation at high resolution: A microwave-optical/IR synergistic approach // *International Journal of Remote Sensing*. 2003. V. 24. No. 22. P. 4599–4622.
17. Farrar T.J., Nicholson S.E., Lare A.R. The influence of soil type on the relationships between NDVI, rainfall, and soil moisture in semiarid Botswana. II. NDVI response to soil moisture // *Remote Sensing of Environment*. 1994. V. 50. No. 2. P. 124–133.
18. Habiboullah A., Louly M.A. Soil moisture prediction using NDVI and NSMI satellite data: ViT-based models and ConvLSTM-based model // *SN Computer Science*. 2023. V. 4. No. 2. Article No. 140.
19. Lakhankar T. Non-parametric methods for soil moisture retrieval from satellite remote sensing data // *Remote Sensing*. 2009. V. 1. No. 1. P. 3–21.
20. Thanabalan P., Vidhya R., Kankara R.S. Soil moisture estimation using RISAT-1 and SENTINEL-1 data using modified Dubois model in comparison with averaged NDVI // *Geocarto International*. 2022. V. 37. No. 25. P. 8624–8644.

## References

1. Sandholt I., Rasmussen K., Anderson J. A simple interpretation of the surface temperature/vegetation index space for assessment of the surface moisture status // *Remote Sensing of Environment*. 2002. V. 79. P. 213–224. doi: 10.1016/S0034-4257(01)00274-7
2. Trinh L.H. Application of LANDSAT thermal infrared data to study soil moisture using temperature vegetation dryness index // *Vietnam J. Earth Sciences*. 2014. V. 36. No. 3. P. 262–270. doi: 10.15625/0866-7187/36/3/5909
3. Wan Z., Wang P., Li X. Using MODIS land surface temperature and normalized difference vegetation index products for monitoring drought in the southern Great Plains, USA // *Intern. J. Remote Sensing*. 2004. V. 25. No. 1. P. 61–72. doi: 10.1080/0143116031000115328
4. Zverev A.T., Chin L.Kh. Soil moisture monitoring based on Landsat multispectral survey data // *Исследование Земли из космоса*. 2015. No. 6. P. 62–67 (in Russian).
5. Karavani A., De Cáceres M., De Aragón J.M., Bonet J.A., De-Miguel S. Effect of climatic and soil moisture conditions

on mushroom productivity and related ecosystem services in Mediterranean pine stands facing climate change // *Agricultural and Forest Meteorology*. 2018. V. 248. P. 432–440. doi: 10.1016/j.agrformet.2017.10.024

6. Tyc O., Song C., Dickschat J.S., Vos M., Garbeva P. The ecological role of volatile and soluble secondary metabolites produced by soil bacteria // *Trends in Microbiology*. 2017. V. 25. No. 4. P. 280–292. doi: 10.1016/j.tim.2016.12.002

7. Vadyunina A.F., Korchagina Z.A. Methods for studying the physical properties of soils. Moskva: Agropromizdat, 1986. 416 p. (in Russian).

8. Demyanov V.V., Saveleva E.A. Geostatistics: theory and practice. Moskva: Nauka, 2010. 327 p. (in Russian).

9. Llerena S., Toasa G., Kurbatova A.I. NDVI – alpha diversity relationship in tropical montane cloud forest of Ecuador // *Theoretical and Applied Ecology*. 2022. No. 3. P. 58–67. doi: 10.25750/1995-4301-2022-3-058-067

10. Chen T., DeJeu R.A.M., Liu Y.Y., van der Werf G.R., Dolman A.J. Using satellite based soil moisture to quantify the water driven variability in NDVI // *Remote Sensing of Environment*. 2014. V. 140. P. 330–338. doi: 10.1016/j.rse.2013.08.022

11. Kutuyavina T.I., Rutman V.V., Ashikhmina T.Ya., Savinykh V.P. The use of satellite images to determine the boundaries of water bodies and study the processes of eutrophication // *Theoretical and Applied Ecology*. 2019. No. 3. P. 28–33 (in Russian). doi: 10.25750/1995-4301-2019-3-028-033

12. Shikhov A.N., Gerasimov A.P., Ponomarchuk A.I., Perminova E.S. Thematic interpretation and interpretation of space images of medium and high spatial resolution. Perm: PGNIU, 2020. 191 p. (in Russian).

13. Sharma M., Bangotra P., Gautam A.S., Gautam S. Sensitivity of normalized difference vegetation index (NDVI) to land surface temperature, soil moisture and precipitation over district Gautam Buddha Nagar, UP, India // *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment*. 2022. V. 36. No. 6. P. 1779–1789.

14. Joiner J., Yoshida Y., Anderson M., Holmes T., Hain C., Reichle R., Zeng F.W. Global relationships among traditional reflectance vegetation indices (NDVI and NDII), evapotranspiration (ET), and soil moisture variability on weekly timescales // *Remote Sensing of Environment*. 2018. V. 219. P. 339–352. doi: 10.1016/j.rse.2018.10.020

15. Carlson T.N., Perry E.M., Schmugge T.J. Remote estimation of soil moisture availability and fractional vegetation cover for agricultural fields // *Agricultural and Forest Meteorology*. 1990. V. 52. No. 1–2. P. 45–69. doi: 10.1016/0168-1923(90)90100-K

16. Chauhan N.S., Miller S., Ardanuy P. Spaceborne soil moisture estimation at high resolution: A microwave-optical/IR synergistic approach // *International Journal of Remote Sensing*. 2003. V. 24. No. 22. P. 4599–4622. doi: 10.1080/0143116031000156837

17. Farrar T.J., Nicholson S.E., Lare A.R. The influence of soil type on the relationships between NDVI, rainfall, and soil moisture in semiarid Botswana. II. NDVI response to soil moisture // *Remote Sensing of Environment*. 1994. V. 50. No. 2. P. 121–133. doi: 10.1016/0034-4257(94)90039-6

18. Habiboullah A., Louly M.A. Soil moisture prediction using NDVI and NSMI satellite data: ViT-based models and ConvLSTM-based model // *SN Computer Science*. 2023. V. 4. No. 2. Article No. 140. doi: 10.1007/s42979-022-01554-7

19. Lakhankar T. Non-parametric methods for soil moisture retrieval from satellite remote sensing data // *Remote Sensing*. 2009. V. 1. No. 1. P. 3–21. doi: 10.3390/rs1010003

20. Thanabalan P., Vidhya R., Kankara R.S. Soil moisture estimation using RISAT-1 and SENTINEL-1 data using modified Dubois model in comparison with averaged NDVI // *Geocarto International*. 2022. V. 37. No. 25. P. 8624–8644. doi: 10.1080/10106049.2021.2003443

## Potential of three plant species for phytoremediation of oil-contaminated soils in northern conditions

© 2023. D. V. Tarabukin ORCID: 0000-0001-8572-4902

Institute of Biology of Komi Science Centre of the Ural Branch  
of the Russian Academy of Sciences,  
28, Kommunisticheskaya St., Syktyvkar, Russia, 167982,  
e-mail: dim1822@yandex.ru

The aim of this work was to assess the potential of three plant species (*Brassica juncea* L., *Trifolium repens* L., *Agrostis stolonifera* L.) for phytoremediation of oil-contaminated soils. The germination time of seeds and their survival rate after sowing into the model oil-contaminated soil were found. The influence of the procedure of encapsulation of seeds in alginate gel was assessed. Green manure plants seeds are preferably added after 30 days of self-cleaning of the soil due to the absence of a continuous oil film and restoration of air exchange. *Brassica juncea* L. was found to have the shortest germination time, at the same time the encapsulation of seeds in a polymeric complex increased the time for the development of vegetative organs. The encapsulation of *T. repens* L. and *A. stolonifera* L. seeds in alginate gels, on the contrary, reduced the germination time. *A. stolonifera* was also found to be more drought-resistant. It was concluded that the use of an auxiliary gel coat is most effective for small plant seeds and increases the survival rate on oil-contaminated soil.

The contribution of the green manure plants root rhizosphere to the processes of biochemical transformation of oil was assessed by comparing such diagnostic indicators of the state of the soil as the activity of dehydrogenase and urease. The dehydrogenase activity in all versions of the experiment was higher than in the oil-free soil. Moreover, for *T. repens* and *A. stolonifera* the values were 20–25% higher than in the contaminated soil without plants. The urease activity also increased, however, in the experiments with plants it was less than in the control experiment with the oil. In general, the selected plants can act as green manures for the accelerated formation of phytomass and restoration of species diversity on the recultivation territories.

**Keywords:** green manure plants, petroleum pollution, alginate beads, encapsulation, enzymatic diagnostics.

УДК 579.6:550.47

## Потенциал трёх видов растений для фиторемедиации нефтезагрязнённых почв в условиях Севера

© 2023. Д. В. Тарабукин, к. б. н., н. с.,

Институт биологии Коми научного центра  
Уральского отделения Российской академии наук,  
167982, Россия, г. Сыктывкар, ул. Коммунистическая, д. 28,  
e-mail: dim1822@yandex.ru

Целью работы была оценка потенциала трёх видов растений (*Brassica juncea* L., *Trifolium repens* L. и *Agrostis stolonifera* L.) для фиторемедиации нефтезагрязнённых почв. На модельной нефтезагрязнённой почве было определено время всхожести семян, выживаемость, оценено влияние процедуры включения семян в альгинатный гель. Выявлено, что вспомогательная гелевая оболочка наиболее эффективна для мелких семян растений, она повышает их выживаемость на нефтезагрязнённой почве. Вклад прикорневой ризосферы растений сидератов в процессы биохимической трансформации нефти был оценён через сравнение таких диагностических показателей состояния почвы, как активность дегидрогеназы и уреазы. В целом, выбранные растения могут выступать в качестве сидератов для ускоренного формирования фитомассы и восстановления видового разнообразия на участках рекультивации.

**Ключевые слова:** сидераты, нефтяное загрязнение, альгинатные шарики, инкапсуляция, ферментативная диагностика.



Phytoremediation as a method of restoration of oil-contaminated soils is widely used in different stages of recultivation [1–3]. The use of oil-resistant plants enables to create an environment in the soil for effective decomposition of oil products through the formation of near-root rhizosphere of hydrocarbon oxidizing microorganisms. For example, the work [4] shows the survival rate and, as a result, potential effectiveness of *Cynodon dactylon* L., *Eleusine indica* L., *Alternanthera sessilis* L. for phytoremediation. Moreover, *E. indica* and *A. sessilis*, besides rhizosphere biodegradation, were able to accumulate oil products in vegetative organs. *Bassia scoparia* L. is suggested for reclamation of arid lands in case of oil contamination within 2–3% [5]. It was found to have a good acclimation rate and also the ability to decrease the concentration of both hydrocarbons and sulphur in the soil. Another work [6] assessed the potential of *Crotalaria pallida* L. at different concentrations of crude oil. The plant turned out to be effective for phytoremediation up to 10 percent oil concentration, so it is recommended for preparation of the soil for further sowing of agricultural crops. The work [7] compared the efficiency of bioremediation of the crude oil-contaminated soil using *Testuca arundinacea* L. as compared to bioaugmentation and self-purification. It was found that bioaugmentation is more effective in the initial purification stages up to 30 days. Phytoremediation at the same time turned out to be more effective after 90 days of the experiment. Therefore, using *T. arundinacea* jointly with bioaugmentation turned out to be the most efficient approach to reclamation of oil-contaminated salinized soils. The role of rhizospheric fungi in oil decomposition is also worth noting. For example, the fungi of the genus *Fusarium* [8] turned out to be resistant to a ten percent (by mass) concentration of oil in the soil. The model experiments showed that the strains of the fungus *Fusarium* sp. played the main role in bioremediation of oil-contaminated soils, but the roots of the plants *Amaranthus retroflexus* L. reinforced this process.

Purpose of this work is to assess the potential of three plant species (*Brassica juncea* L., *Trifolium repens* L., *Agrostis stolonifera* L.) for phytoremediation of oil-contaminated soils.

### Materials and Methods

The objects of study were soils selected in the vicinity of the Syktyvkar city and plants. The seeds of the following types of plants were used in

the work: *Brassica juncea* L., *Trifolium repens* L. and *Agrostis stolonifera* L. The model soil for recultivation was prepared from the upper layers of meadow and forest soils of 10 cm in depth. The meadow soil was sampled from the former agrocenosis and was characterized by a low content of humus. The forest soil was selected in spruce forests with green moss. Soils are classified as Haplic Albeluvisols [9]. All the soil samples were selected in mid-April, the vegetative organs of the local flora were not yet developed. The soil acidity (pH) was 5.8 for the meadow soil and 6.3 for the forest soil.

The first experiment consisted of the assessment of the potential of self-cleaning of the meadow and forest soils after introduction of oil. Before the beginning of the experiment the soil samples were ground and sifted through a sieve with 5 mm mesh size. Then the soil samples with the mass of 100 g and 10% humidity were placed into vegetation vessels with 8 g of oil and 0.1 g of mineral fertilizer (ammonium nitrogen – 10%; total phosphates – 25%; potassium in terms of  $K_2O$  – 25%). Soil samples in the vessels were placed in conditions close to natural for a period of 90 days. The level of humidity maintained in the vessels was 20–30%. Dynamic changes of total petroleum hydrocarbons (TPH) in the soil were assessed after 30, 60 and 90 days.

Before the beginning of the experiment with plants, the meadow and forest soils were mixed with the ratio 50/50. Then the soil samples with the mass of 100 g and 10% humidity were placed into vegetation vessels, adding 8 g of oil. The vessels with the oil were held outdoors for 30 days before the introduction of the seeds. Then the soil in the vessels was slightly mellowed, the plant seeds were introduced together with 0.1 g of mineral fertilizer. The soil samples without seeds but with fertilizer were used as a control. Within a month the germination and survival rates were assessed, and after 30 days, the changes in dehydrogenase and urease activity. During the observation period significant temperature variations were noted, within the range from 0 °C at night to 28 °C by day. The level of humidity maintained in the vessels was 20–30%. However, twice in the course of the experiment water was not added for 2 days, modelling drought. All variants of the experiment were laid in three repetitions.

The polymeric environment to improve the safety of seeds was formed from a biocompatible polymer. To form gel beads with seeds 2% sodium alginate solution was prepared, which contained 0.1% of polyacrylic acid. The seeds of

every type of plant were suspended in polymeric solutions, then measured out drop by drop into 1% CaCl<sub>2</sub>. Then the gel beads with seeds were taken out, washed with tap water and, before being planted into the soil, were kept for 3 days in 0.1 M potassium phosphate buffer (pH 6.0). Before sowing, untreated seeds were held for 12 hours in the same buffer solution.

The primary biochemical assessment of the state of soils in the process of phytoremediation was carried out by measuring the activities of dehydrogenase and urease. Dehydrogenase activity was determined using the reduction of 2,3,5-triphenyltetrazolium chloride (TTC) method [10]. A sample of 1 g soil was transferred into test tube with stopper. 10 cm<sup>3</sup> of 0.5% TTC was added. The mixture was mixed on a vortex and incubated at 30 °C. After 24 h, the triphenylformazan, a product from the reduction of TTC, was extracted by adding 10 cm<sup>3</sup> acetone and shaken for 1 min. The sample was collected in a volumetric flask. The tube was washed with acetone until the red color disappeared. The filtrate was then diluted with additional acetone to a final volume of 50 cm<sup>3</sup>. The color intensity was measured at 485 nm with acetone as a blank. One unit of dehydrogenase activity represented the number of enzymes in 1 g of the air-dried soil that form 1 µg of triphenylformazan per 24 hours in the presence of 0.5% triphenyltetrazolium chloride solution.

The urease activity, content of microscopic fungi and residual TPH content were determined according to the methods described in the work [11]. For all methods, the Microsoft Excel statistical analysis package was used. In particular, “one-way ANOVA” was used.

## Results and Discussion

This experiment revealed that during the first 30 days in natural conditions the most intensive TPH decomposition occurs in meadow soil, with its content decreasing by 35±5% (Fig. 1). In forest soil, the content decreases by 25±5%. On days 60 and 90, the process of TPH decomposition in meadow and forest soils stops. Therefore, after 30 days the potential for self-purification was exhausted, this is why additional measures for acceleration of the processes of biodegradation of oil products in the soil are necessary.

After 30 days outdoors, thanks to abiotic factors as well as self-regeneration processes, the oil film disappeared, and oil remains in the soil were gathered into local accumulations. The restoration of air change helped the survival of the seeds in contaminated soil (Fig. 2). As part of this work, the effectiveness of the procedure of encapsulation of seeds in alginate gel for better adaptation in the oil-contaminated soil was also assessed.

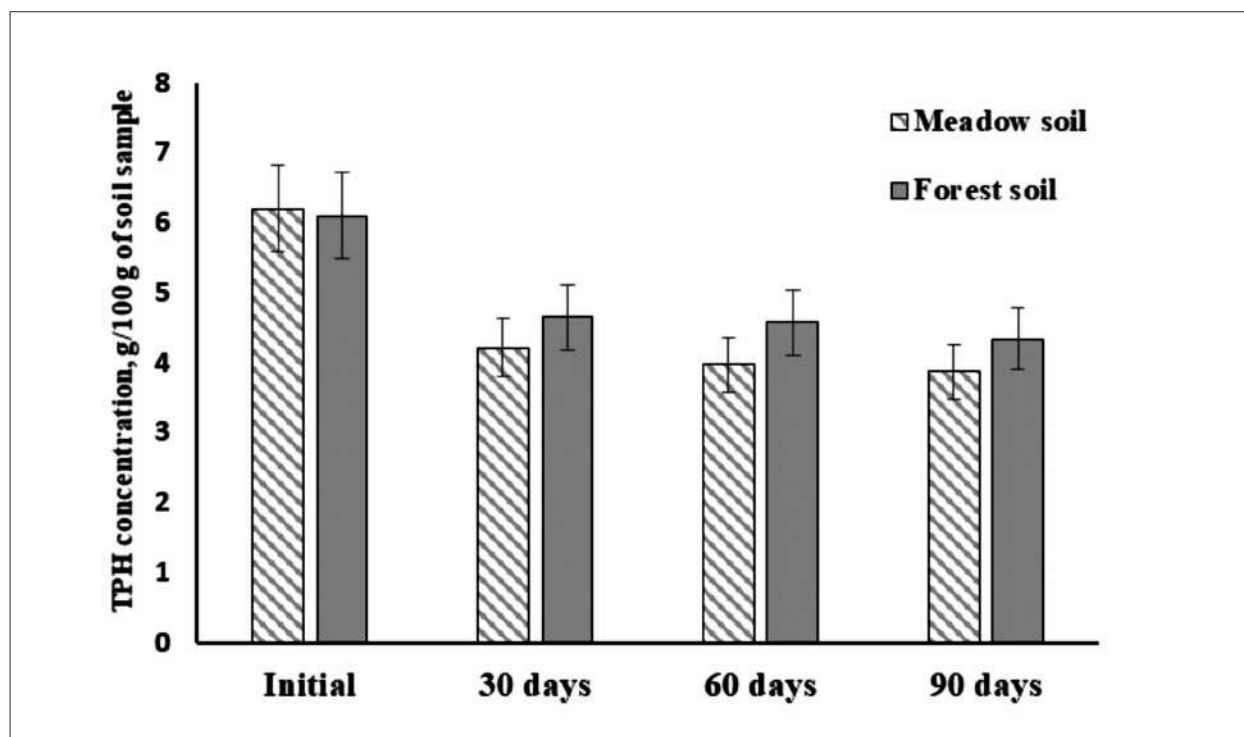
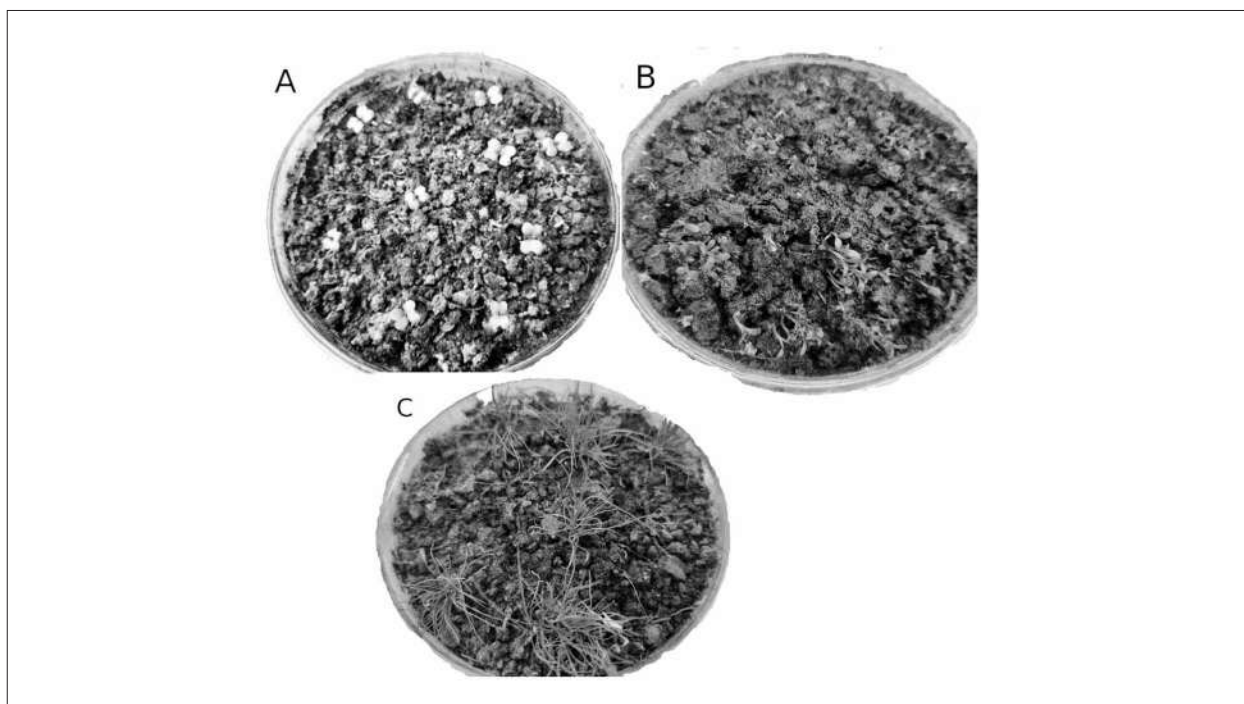


Fig. 1. Dynamics of TPH concentration changes in soil samples during *ex situ* remediation. The “Initial point” represents the data of TPH concentration after introduction petroleum to soil samples



**Fig. 2.** Fresh sprouts of model plants on oil-contaminated soils in 20 days after sowing (A – *Brassica juncea*; B – *Trifolium repens*; C – *Agrostis stolonifera*; experiment versions with the insertion of seeds into alginate gel)

Previous studies show that the use of alginate gels for plant growing is intended to ensure the safety of sprouts and spores as well as better survival rate during reproduction [12, 13]. For example, the tips of the *Phyllanthus amarus* L. sprouts encapsulated in an alginate cover are able to develop a complete plant [14]. Immobilization of the *Hordeum vulgare* L. seeds paired with phosphatase helped to increase the bioavailability of phosphorus from the soil [15]. Encapsulating the fern seeds *Pteridium aquilinum* var. *latiusculum* (Desv.) Underw. ex A. Heller in alginate gel is viewed as an effective technology for commercial use [16].

It is noted that *B. juncea* fairly easily develops a complete plant even without insertion into a polymeric matrix (Table). The large seeds of *B. juncea* have a sufficient supply of nutrient substances, this is why they do not require a gel cover as an auxiliary instrument. At the same time the plant turned up to be more sensitive to drought. Most probably the conditions of the experiment did not allow *B. juncea* to form a full root system. For *T. repens* and *A. stolonifera* the procedure of encapsulation in alginate gel more clearly influences the germination time (Table). We also noted the significantly higher survival rate of the seeds of *A. stolonifera* as compared to sowing directly onto the surface of the oil-contaminated soil. Moreover, the plant achieved a much bigger biomass as compared

to the control after encapsulation in polymer. *T. repens* grew in a similar way in all experiments and formed sufficiently pronounced vegetative parts. The development of primary turf layer was found in all versions. Therefore, large seeds of green manure plants are resistant to residual oil products and are able to grow on their own in case of sufficient humidity and absence of the oil film. For small seeds, the alginate cover is an additional factor of the survival rate. At the same time, additional experiments are needed to discover the mechanisms of biodegradation of oil products both through the near-root rhizosphere and through assimilation by vegetative organs.

The determination of the activities of the soil ferments is a convenient instrument for the analysis of the state of contaminated soils in the process of bioremediation [17, 18]. The assessment of their functions in supporting the quality of the soil, the balance of carbon and nitrogen, the nutrient utilization combined with other methods allows making a general judgment on the effectiveness of regeneration of disturbed soils [19]. One of the most significant indicators of fermentative activity of the oil-contaminated soil is the activity of dehydrogenase. For example, [20] the activity of dehydrogenase significantly decreased after the introduction of the polyaromatic hydrocarbon pyrene into model soil and noticeably increased after the introduction of *Scirpus triquetra* L. On the other

Some parameters of the soil in the process of phytoremediation

Conditions of recultivation	Emergence of seedlings (days)	Dehydrogenase activity after 30 days, units/g of soil	Urease activity after 30 days, units/g of soil	Fungal mycelium content after 30 days, $\times 10^3$ g of soil
<i>Brassica juncea</i> (control)	5–6	60±6	125±16	6±1
<i>B. juncea</i> + oil	6–7	85±7	271±25	7±1
<i>B. juncea</i> (alginate) + oil	8–9	88±8	241±27	7±1
<i>Trifolium repens</i> (control)	8–9	73±5	98±10	3±1
<i>T. repens</i> + oil	10–11	109±8	285±24	7±1
<i>T. repens</i> (alginate) + oil	6–7	93±9	256±30	8±1
<i>Agrostis stolonifera</i> (control)	9–10	62±5	105±12	6±1
<i>A. stolonifera</i> + oil	20 (small shoots)	86±7	262±22	4±1
<i>A. stolonifera</i> (alginate) + oil	6–7	102±8	275±31	3±1
Oil without plants	–	82±6	376±25	6±1
Control without oil	–	48±4	107±9	4±1

Note: \* – initial dehydrogenase activity of model soil  $53 \pm 5$ , units/g of soil, urease  $112 \pm 8$  units/g of soil.

hand, the presence of up to 3% of straight chain hydrocarbons in the soil increased the dehydrogenase and urease activities [21]. In our experiment the analysis showed increased activities for all types of oil-contaminated soils. And the presence of oil influenced the increase of dehydrogenase activity the most. For *T. repens* and *A. stolonifera* the values were 20–25% higher than in the contaminated soil without plants. At the same time urease activity was maximum for the control oil-contaminated soil. So, viable green manure plants in the oil-contaminated model soil form the rhizosphere, which can subsequently make an additional contribution to the soil self-cleaning processes.

The calculation of content of fungal mycelium did not show any notable difference for different versions of the experiment. It can be assumed that the experiment conditions were not conducive to the development of rhizospheric fungi, and a significant role in this was played by sudden temperature drops as well as drought modelling. Therefore, for a more nuanced picture additional long-term studies are necessary, which will enable to realize the full potential of phytoremediation through model plants as well as near-root microbiota.

### Conclusion

Meadow and forest soils are capable of intensive self-purification from oil products within the first 30 days. It is mostly the low molecular weight oil components that are disposed of. This

is due to both abiotic factors and the activity of soil microorganisms. Then the process almost stops, which requires creation of additional conditions for the intensification of the processes of oil biodegradation. It is suitable to sow seeds after 30 days of self-purification due to absence of the oil film and restoration of air change in the soil. It was found that *Brassica juncea* L., *Trifolium repens* L. and *Agrostis stolonifera* L. are able to produce vegetative organs on the model oil-contaminated soil after sowing the seeds. The technological process of encapsulation of plant seeds in gels is sufficiently effective and can be used to increase the survival and germination rates in the oil-contaminated soil, accelerated formation of phytomass and restoration of species diversity on the recultivation territories. Even without strict microbiological control in the soil, biochemical indicators show a strong reaction to oil and, as a result, activation of self.

*This study was carried out with financial support from RFBR, Project No. 18-29-05028 mk and partial financial support: 1021051101411-4-1.6.23.*

### References

1. Aliku C.B., Madu C.N., Aliku O.O. Organic stimulants for enhancing phytoremediation of crude oil polluted soil: A study on cowpea // Environmental Pollution. 2021. V. 287. Article No. 117674. doi: 10.1016/j.envpol.2021.117674
2. Melekhina E.N., Kanev V.A., Markarova M.Yu., Nadezhkin S.M., Nowakowski A.B., Taskaeva A.A.,

- Tarabukin D.V., Velegzhaninov I.O., Rasova E.E. Assessment of the state of oil-polluted ecosystems of European Subarctic: a multidisciplinary approach // *Theoretical and Applied Ecology*. 2020. No. 2. P. 123–129 (in Russian). doi: 10.25750/1995-4301-2020-2-123-129
3. Lopez-Echartea E., Michal S., Mukherjee S., Uhlik O., Yrjälä K. Bacterial succession in oil-contaminated soil under phytoremediation with poplars // *Chemosphere*. 2020. V. 243. Article No. 125242. doi: 10.1016/j.envpol.2021.117674
  4. Nguemté P.M., Wafo G.V.D., Djougoue P.F., Noum-si I.M.K., Ngnien A.W. Potentialities of six plant species on phytoremediation attempts of fuel oil-contaminated soils // *Water Air Soil Pollut.* 2018. V. 229. No. 3. Article No. 88. doi: 10.1007/s11270-018-3738-9
  5. Moubasher H.A., Hegazy A.K., Mohamed N.H., Moustafa Y.M., Kabieli H.F., Hamad A.A. Phytoremediation of soils polluted with crude petroleum oil using *Bassia scoparia* and its associated rhizosphere microorganisms // *International Biodeterioration & Biodegradation*. 2015. No. 98. P. 113–120. doi: 10.1016/j.ibiod.2014.11.019
  6. Baruah P., Deka S., Baruah P.P. Phytoremediation of crude oil-contaminated soil employing *Crotalaria pallida* Aiton // *Environ. Sci. Pollut. Res.* 2016. No. 23. P. 10595–10603. doi: 10.1007/s11356-016-6227-y
  7. Cai B., Ma J., Yan G., Dai X., Li M., Guo S. Comparison of phytoremediation, bioaugmentation and natural attenuation for remediating saline soil contaminated by heavy crude oil // *Biochemical Engineering Journal*. 2016. No. 112. P. 170–177. doi: 10.1016/j.bej.2016.04.018
  8. Mohsenzadeh F., Rad A.C. Bioremediation of petroleum polluted soils using *Amaranthus retroflexus* L. and its rhizospheric fungi // *Phytoremediation for green energy* / Eds. M. Öztürk, M.A.A. Aksoy, M.S.A. Ahmad. Springer, 2015. P. 131–139. doi: 10.1007/978-94-007-7887-0\_9
  9. World Reference Base for Soil Resources 2014: International Soil Classification System for Naming Soils and Creating Legends for Soil Maps; World Soil Resources Report; Food and Agriculture Organization of the United Nations: Rome, Italy, 2015. 106 p.
  10. Tabatabai M.A. Soil enzymes. Madison: Soil Science Society of America, 1994. P. 775–833. doi: 10.2136/sssabookser5.2.c37
  11. Tarabukin D.V. Assessment of the lowland bog biomass for *ex situ* remediation of petroleum-contaminated soils // *Environments*. 2020. V. 7. No. 86. P. 1–41. doi: 10.3390/environments7100086
  12. Zhang W., Zheng L., Lang D., Zhang X., Ma X., Li X., Zhang X. Eco-friendly bio-encapsulation from sodium alginate-trehalose-kaolin and its performance evaluation in improving plant growth under salt or/and drought conditions // *International Journal of Biological Macromolecules*. 2023. V. 225. P. 123–134. doi: 10.1016/j.ijbiomac.2022.12.009
  13. Tomadoni B., Salcedo M.F., Mansilla A.Y., Casalongué C.A., Alvarez V.A. Macroporous alginate-based hydrogels to control soil substrate moisture: Effect on lettuce plants under drought stress // *European Polymer Journal*. 2020. V. 137. Article No. 109953. doi: 10.1016/j.eurpolymj.2020.109953
  14. Singh A.K., Sharma M., Varshney R., Agarwal S.S., Bansal K.C. Plant regeneration from alginate-encapsulated shoot tips of *Phyllanthus amarus* schum and thonn, a medicinally important plant species // *In vitro Cellular & Developmental Biology Plant*. 2006. No. 42. P. 109–113. doi: 10.1079/IVP2005735
  15. Pilar-Izquierdo M.C., Busto M.D., Ortega N., Perez-Mateos M. Barley seeds encapsulated in calcium-alginate gels with phosphatase and humate-phosphatase complexes for improving phosphorus bioavailability // *Agronomy Journal*. 2013. V. 105. No. 6. P. 1565–1570. doi: 10.2134/agronj2013.0010
  16. Jang B.K., Cho J.S., Lee C.H. Synthetic Seed Technology development and production studies for storage, transport, and industrialization of bracken spores // *Plants*. 2020. V. 9. No. 1079. P. 1–12. doi: 10.3390/plants9091079
  17. Shukla G., Varma A. Soil enzymology. Berlin Heidelberg: Springer, 2011. 384 p. doi: 10.1007/978-3-642-14225-3
  18. Chakravarty P., Chowdhury D., Deka H. Ecological risk assessment of priority PAHs pollutants in crude oil contaminated soil and its impacts on soil biological properties // *Journal of Hazardous Materials*. 2022. V. 437. Article No. 129325. doi: 10.1016/j.jhazmat.2022.129325
  19. Kovaleva E.I., Trofimov S.Ya., Zhongqi C. Impact of oil contamination on ecological functions of peat soils from West Siberia of Russia // *Journal of Environmental Quality*. 2021. V. 50. No. 1. P. 49–62. doi: 10.1002/jeq2.20171
  20. Zhang X., Liu X., Liu S., Liu F., Chen L., Xu G., Zhong C., Su P., Cao Z. Responses of *Scirpus triquetra*, soil enzymes and microbial community during phytoremediation of pyrene contaminated soil in simulated wetland // *Journal of Hazardous Materials*. 2011. No. 193. P. 45–51. doi: 10.1016/j.jhazmat.2011.07.094
  21. Ramadass K., Meghara M., Venkateswarlu K., Naidu R. Ecological implications of motor oil pollution: Earthworm survival and soil health // *Soil Biology and Biochemistry*. 2015. No. 85. P. 72–81. doi: 10.1016/j.soilbio.2015.02.026

## Выявление токсического воздействия тяжёлых металлов на фитопланктон с помощью анализа индукционных кривых флуоресценции хлорофилла методами машинного обучения

© 2023. Т. Ю. Плюснина<sup>1</sup>, к. ф.-м. н., доцент,  
 Р. Н. Червицов<sup>1</sup>, студент, С. С. Хрущев<sup>1</sup>, к. б. н., в. н. с.,  
 Д. Г. Киселева<sup>1</sup>, аспирант, Т. В. Дрозденко<sup>2</sup>, к. б. н., доцент, с. н. с.,  
 Е. И. Тихомирова<sup>3</sup>, д. б. н., профессор,  
 Г. Ю. Ризниченко<sup>1</sup>, д. ф.-м. н., профессор, Т. К. Антал<sup>2</sup>, д. б. н., г. н. с.,  
<sup>1</sup>Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова,  
 119991, Россия, г. Москва, ул. Колмогорова, д. 1,  
<sup>2</sup>Псковский государственный университет,  
 180000, Россия, г. Псков, пл. Ленина, д. 2,  
<sup>3</sup>Саратовский государственный технический университет  
 имени Гагарина Ю. А.,  
 410054, Россия, г. Саратов, ул. Политехническая, д. 77,  
 e-mail: plusn@yandex.ru, styx@biophys.msu.ru, taras\_an@mail.ru

Создание сети автономных станций биоиндикации состояния водных объектов требует разработки методов анализа больших массивов данных. В данной работе показано, каким образом сочетание методов машинного обучения с традиционными статистическими методами может быть использовано для выявления неявных закономерностей в массиве данных по действию тяжёлых металлов на природный фитопланктон. Массив экспериментальных данных представляет собой 465 кривых индукции флуоресценции, измеренных на образцах фитопланктона из 9 водоёмов Псковской области, и отражающих динамику переноса электрона в фотосинтетическом аппарате клеток водорослей. Каждая кривая характеризуется 14 параметрами JIP-теста, часть из которых непосредственно описывают форму кривой, другая часть параметров связывает форму кривой с энергетическими потоками, возникающими в фотосинтетическом аппарате в ответ на получение клеткой кванта света. На базе массива параметров JIP-теста методами кластерного анализа был проведён анализ различий в фотосинтетической активности проб фитопланктона из 9 водоёмов Псковской области в контроле и при долгосрочном воздействии солей кадмия и хрома. В контрольных пробах были выявлены две группы, различающиеся фотосинтетической активностью фитопланктона. Предполагается, что более низкая фотосинтетическая активность проб фитопланктона связана с антропогенной нагрузкой на водоёмы, из которых были взяты соответствующие образцы. Показано, что в пробах с изначально низкой активностью фотосинтетического аппарата токсическое действие тяжёлых металлов проявляется на более поздних сроках инкубации по сравнению с более активными пробами. Предложенный подход может быть легко масштабирован для анализа больших массивов экспериментальных данных, что делает его перспективным инструментом для раннего обнаружения токсического загрязнения природных вод.

**Ключевые слова:** тяжёлые металлы, водные экосистемы, фитопланктон, экологический мониторинг, флуоресценция хлорофилла, фотосинтез, машинное обучение, кластерный анализ.

## Identification of the toxic effects of heavy metals on phytoplankton by the analysis of chlorophyll fluorescence induction curves using machine learning

© 2023. T. Yu. Plyusnina<sup>1</sup> ORCID: 0000-0002-0734-1727, R. N. Chervitsov<sup>1</sup> ORCID: 0000-0003-3310-6517,  
 S. S. Khrushchev<sup>1</sup> ORCID: 0000-0002-4714-6221, D. G. Kiseleva<sup>1</sup> ORCID: 0000-0001-8149-349X,  
 T. V. Drozdenko<sup>2</sup> ORCID: 0000-0002-5553-2296, E. I. Tikhomirova<sup>3</sup> ORCID: 0000-0001-6030-7344,  
 G. Yu. Riznichenko<sup>1</sup> ORCID: 0000-0001-7784-3207, T. K. Antal<sup>2</sup> ORCID: 0000-0002-9690-8034,

<sup>1</sup>Lomonosov Moscow State University,  
 1, Kolmogorova St., Moscow, Russia, 119991,  
<sup>2</sup>Pskov State University,  
 2, Lenina Square, Pskov, Russia, 180000,

<sup>3</sup>Yuri Gagarin State Technical University of Saratov,  
77, Politekhnikeskaya St., Saratov, Russia, 410054,  
e-mail: plusn@yandex.ru, styx@biophys.msu.ru, taras\_an@mail.ru

The creation of a network of autonomous stations for bioindication of water bodies state requires the development of methods for analyzing large data arrays. The combination of machine learning methods with traditional statistical methods is used to identify implicit patterns in the dataset for the effect of heavy metals on natural phytoplankton. The array of experimental data consists of 465 fluorescence induction curves measured on phytoplankton samples from 9 water bodies of the Pskov region, and reflecting the dynamics of electron transfer in the photosynthetic apparatus. Each curve is characterized by 14 JIP-test parameters, some of which directly describe the shape of the curve; the others connect the shape of the curve with the energy flows that occur in the photosynthetic apparatus under illumination. Cluster analysis based on a set of JIP-test parameters was used to distinguish photosynthetic activity first among phytoplankton samples in control and then under long-term exposure to cadmium and chromium salts. In the control samples, two groups were identified that differ in the photosynthetic activity of phytoplankton. It is assumed that the lower photosynthetic activity of phytoplankton samples is associated with anthropogenic pressure on the water bodies. It was shown that the samples with initially low photosynthetic activity responded to the toxic effect of heavy metals at later periods of incubation compared to more active samples. The proposed approach can be easily scaled to analyze large arrays of experimental data that makes it a promising tool for the early detection of toxic pollution of natural waters.

**Keywords:** heavy metals, aquatic ecosystems, phytoplankton, environmental monitoring, chlorophyll fluorescence, photosynthesis, machine learning, cluster analysis.

Тяжёлые металлы (ТМ) – одни из наиболее распространённых загрязнителей, поэтому актуально изучение их содержания в объектах окружающей среды. Соли ТМ токсичны для фотосинтезирующих организмов и могут вызывать повреждения клеток и нарушение процессов фотосинтеза. В частности, ТМ могут взаимодействовать с SH-группами белков, а также встраиваться в металлосодержащие соединения вместо необходимого иона [1–5]. Ионы металлов с переменной валентностью могут вызывать генерацию свободных радикалов. Кроме того, дихромат-ионы ( $Cr_2O_7^{2-}$ ) являются сильными окислителями и способны окислять белки и мембранные липиды. В связи с этим, возникает необходимость выявить наличие ионов ТМ в среде как можно раньше. В данной работе мы рассматриваем действие ТМ на микроводоросли для определения методики выявления загрязнений путём биоиндикации.

Поскольку в разных водных объектах таксономический состав фитопланктона и химический состав воды различаются, то и реакция фитопланктона из различных водных объектов на загрязнение также может быть неодинакова.

В качестве экспресс-теста для оценки функционального состояния фотосинтетического аппарата (ФСА) растений часто используется регистрация кинетики возрастания (индукции) флуоресценции хлорофилла *a* под действием света [6]. Интенсивность флуоресценции определяется окислительно-восстановительным состоянием компонентов фотосинтетической электрон-транспортной

цепи, поэтому, так как ТМ действуют на ФСА, форма индукционной кривой меняется при действии ТМ.

Наиболее широко используемым методом анализа индукционных кривых является JIP-тест [6], который связывает изменение формы кривой с изменениями в ФСА. Различные параметры JIP-теста позволяют охарактеризовать отдельные стадии переноса электрона по электрон-транспортной цепи фотосинтеза. Снижение максимального квантового выхода первичной фотохимической реакции ( $\Phi_{P_0}$ ) обычно свидетельствует о повреждении донорной стороны фотосистемы 2 (ФС2) [7]. Изменение параметра ABS/RC (потока поглощённой световой энергии на реакционный центр ФС2) обычно связывают с изменением эффективной площади сечения светособирающей антенны. Увеличение ABS/RC часто происходит при уменьшении количества активных реакционных центров ФС2, например, при температурном [8, 9] или токсическом стрессе [10]. Уменьшение параметра  $\psi_0$ , характеризующего вероятность переноса электрона с ФС2 в пул пластохинонов (ПХ), означает замедление электронного транспорта. Это происходит при перевосстановлении ПХ, что может быть вызвано как ингибированием более поздних стадий электронного транспорта, так и замедлением темновых стадий фотосинтеза (цикла Кальвина – Бенсона – Бассама) [9]. На значение индекса производительности ( $PI_{ABS}$ ) влияют практически любые изменения в ФСА, что позволяет его использовать для обнаружения общего снижения активно-

сти ФСА при действии различных факторов стресса (нагревание, охлаждение, действие токсикантов, нехватка азота) [8, 9, 11].

Создание сети автономных станций биоиндикации состояния водных объектов требует разработки методов анализа больших массивов данных. Применение методов машинного обучения, таких как искусственные нейронные сети и кластерный анализ, позволяет существенно ускорить и автоматизировать обработку массивов экспериментальных данных [12]. Нами был представлен прототип искусственной нейронной сети, позволяющий выявлять токсическое действие ТМ на природный фитопланктон. При анализе проб из девяти разнотипных водных объектов Псковской области точность выявления действия ТМ достигала 90% [13].

В отличие от представленной в [13] нейросети, выполняющей прикладную задачу – обнаружение в пробах ТМ, кластерный анализ может быть полезным для решения более общей задачи – упорядочивания большого массива проб фитопланктона из различных водоёмов с выделением групп с различными характеристиками фотосинтетического аппарата. Анализ фотосинтетических характеристик в каждой группе может выявить потенциальные возможности ответа клеток на действие различных факторов стресса, в частности, ТМ.

При анализе большого массива экспериментальных данных важной является возможность его визуализации. Для характеристики фотосинтетического аппарата используется большое (более десяти) число параметров ЛР-теста, которые образуют многомерное пространство. Чтобы визуализировать данные, необходимо уменьшить размерность этого пространства. Среди методов машинного обучения широко используется метод главных компонент (РСА), осуществляющий поиск таких линейных комбинаций исходных признаков, при котором происходит наименьшая потеря информации [14]. Из нелинейных методов часто используются *t*-SNE [15] и UMAP [16], осуществляющие уменьшение размерности исходного пространства признаков так, чтобы расстояния между объектами, далёкими в исходном пространстве, оставались большими в новом пространстве, а расстояния между близкими объектами – малыми. В результате массив данных можно наглядно представить на плоскости или в объёме. Часто уменьшение размерности используется в качестве предварительного этапа перед кластеризацией.

Цель работы: исследовать, насколько однородной по своим фотосинтетическим характеристикам является выборка проб фитопланктона из 9 природных водоёмов Псковской области. Из массива исходных данных – кривых индукции флуоресценции, полученных на образцах фитопланктона из исследуемых водоёмов, методами кластерного анализа предполагается выделить группы со сходными характеристиками фотосинтетического аппарата и проанализировать реакцию фитопланктона в каждой группе на действие тяжёлых металлов.

### Объекты и методы исследования

Экспериментальные данные, анализируемые в работе, подробно описаны в [13]. Пробы природного фитопланктона были отобраны с поверхностного горизонта 9 водных объектов, расположенных в Псковской области: дельты р. Великой, р. Камёнка, пруда на р. Мирожке, озёр Чудского, Псковского, Тёплого, Калацкого, Лесицкого и Тиглицы. Каждая проба была разделена на шесть частей, две из них выступали в качестве контроля, а в остальные были добавлены токсиканты ( $\text{CdSO}_4$  или  $\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$ ) в концентрации 20 мкМ и 50 мкМ. Эти пробы инкубировали в люминостате при интенсивности света 50 мкмоль фотонов/ $(\text{м}^2 \cdot \text{с})$  с периодом освещения: 12/12 ч день/ночь при температуре 20–22 °С несколько суток, и через каждые 3–5 ч (с перерывами на ночь) проводилось измерение кривых индукции флуоресценции (ОЛР кривых) с помощью прибора AquaPen-C 100 (Photon System Instruments, Чехия) при интенсивности вспышки 1000 мкмоль фотонов/ $(\text{м}^2 \cdot \text{с})$  и длине волны 650 нм. Всего было получено 465 кривых индукции флуоресценции, для каждой из них были рассчитаны параметры ЛР-теста [6]. Полученные данные были сгруппированы по двум временным интервалам – от 0 до 9 ч инкубации, и от 17 до 33 ч инкубации.

Анализ данных проводили с помощью средств языка программирования Python. Для анализа использовали 14 параметров ЛР-теста, характеризующих активность ФСА и не зависящих от биомассы фитопланктона в пробе. Были выбраны как исходные параметры, полученные непосредственно из самой кривой и характеризующие её форму –  $V_f$ ,  $V_i$ ,  $M_0$ ,  $S_m$ ,  $S_s$ ,  $N$ , так и параметры, составленные из исходных, характеризующие различные энергетические потоки –  $\text{ABS}/\text{RC}$ ,  $\text{DI}_0/\text{RC}$ ,  $\text{ET}_0/\text{RC}$ ,  $\text{TR}_0/\text{RC}$  и общую эффективность



работы ФСА –  $\varphi_{Po}$ ,  $\varphi_{Eo}$ ,  $\varphi_{Pav}$ ,  $PI_{ABS}$ . Подробное описание значения параметров JIP-теста даётся в [6]. 108 индукционных кривых, полученных на первых 33 часах инкубации без добавления токсикантов, использовали для сравнения фотосинтетической активности фитопланктона отдельных проб.

Предварительное исследование массива данных, так называемый разведочный анализ, проводили с использованием пакета pandas (библиотека Python, используемая для работы с табличными данными, <https://pandas.pydata.org/>). Для каждого параметра JIP-теста построены ядерные оценки плотности распределения, для каждой пары параметров – построены диаграммы рассеяния и рассчитаны коэффициенты корреляции Пирсона. Для визуализации данных использовали библиотеки Python Matplotlib (<https://matplotlib.org/>) и seaborn (<https://seaborn.pydata.org/>).

Кластерный анализ проводили после уменьшения размерности данных с помощью сочетания методов PCA и *t*-SNE (вариант 1), PCA и UMAP (вариант 2) с помощью метода *k*-средних из пакета scikit-learn (<https://scikit-learn.org/>). Для выбора оптимального количества кластеров вычислялся коэффи-

циент силуэта (silhouette score) для каждого варианта кластеризации.

Определение достоверности различий между выборками проводили с помощью непараметрического статистического U-критерия Манна-Уитни из пакета SciPy (<https://scipy.org/>). Различия между выборками считали значимыми, если *p*-значение было меньше 0,05.

### Результаты и обсуждение

Разведочный анализ данных для 108 измерений без добавления токсиканта показал, что распределения всех параметров JIP-теста являются унимодальными. На попарных диаграммах рассеяния не было выявлено каких-либо обособленных друг от друга групп точек. Показано, что имеются значительные корреляции между параметрами JIP-теста (табл. 1). Наиболее сильно связаны параметры, характеризующие потоки энергии в расчёте на реакционный центр ( $DI_0/RC$ ,  $ET_0/RC$ ,  $TR_0/RC$ ).

Для уменьшения размерности пространства признаков был применён метод главных компонент (PCA). Показано, что первые 2 главные компоненты описывают 64% разброса данных, 3 – 86%, 7 – 99%. Вклады (факторные

**Таблица 1 / Table 1**  
Коэффициенты корреляции Пирсона для параметров JIP-теста для 108 измерений без добавления токсиканта / Pearson correlation coefficients for JIP test parameters of 108 fluorescence transients of control samples

Параметр Parameter	$V_j$	$V_i$	$M_0$	$S_m$	$S_s$	N	$\varphi_{Po}$	$\varphi_{Eo}$	$\varphi_{Pav}$	$\frac{ABS}{RC}$	$\frac{DI_0}{RC}$	$\frac{ET_0}{RC}$	$\frac{TR_0}{RC}$	$PI_{ABS}$
$V_j$	1,00	0,51	0,56	0,13	-0,04	0,19	-0,22	-0,78	0,39	0,24	0,25	-0,09	0,20	-0,23
$V_i$	0,51	1,00	0,42	0,07	-0,06	0,23	-0,07	-0,38	0,52	0,30	0,29	0,15	0,29	-0,17
$M_0$	0,56	0,42	1,00	0,22	-0,21	0,71	-0,05	-0,39	0,28	0,88	0,86	0,69	0,89	-0,32
$S_m$	0,13	0,07	0,22	1,00	0,05	0,72	-0,36	-0,32	0,61	0,28	0,33	0,13	0,18	-0,03
$S_s$	-0,04	-0,06	-0,21	0,05	1,00	-0,15	0,07	0,07	0,00	-0,18	-0,17	-0,18	-0,21	0,82
N	0,19	0,23	0,71	0,72	-0,15	1,00	-0,21	-0,26	0,42	0,82	0,83	0,69	0,75	-0,22
$\varphi_{Po}$	-0,22	-0,07	-0,05	-0,36	0,07	-0,21	1,00	0,78	-0,44	-0,15	-0,24	0,11	0,05	0,40
$\varphi_{Eo}$	-0,78	-0,38	-0,39	-0,32	0,07	-0,26	0,78	1,00	-0,55	-0,24	-0,31	0,12	-0,10	0,42
$\varphi_{Pav}$	0,39	0,52	0,28	0,61	0,00	0,42	-0,44	-0,55	1,00	0,23	0,27	0,03	0,14	-0,22
$\frac{ABS}{RC}$	0,24	0,30	0,88	0,28	-0,18	0,82	-0,15	-0,24	0,23	1,00	0,99	0,90	0,97	-0,27
$\frac{DI_0}{RC}$	0,25	0,29	0,86	0,33	-0,17	0,83	-0,24	-0,31	0,27	0,99	1,00	0,86	0,93	-0,27
$\frac{ET_0}{RC}$	-0,09	0,15	0,69	0,13	-0,18	0,69	0,11	0,12	0,03	0,90	0,86	1,00	0,95	-0,18
$\frac{TR_0}{RC}$	0,20	0,29	0,89	0,18	-0,21	0,75	0,05	-0,10	0,14	0,97	0,93	0,95	1,00	-0,26
$PI_{ABS}$	-0,23	-0,17	-0,32	-0,03	0,82	-0,22	0,40	0,42	-0,22	-0,27	-0,27	-0,18	-0,26	1,00

Таблица 2 / Table 2

Вклад (факторная нагрузка) параметров JIP-теста в первые три главные компоненты PCA  
 Contribution (factor loadings) of JIP test parameters to the first three principal components PCA

Параметр Parameter	$V_j$	$V_i$	$M_0$	$S_m$	$S_s$	N	$\Phi_{Po}$	$\Phi_{Eo}$	$\Phi_{Pav}$	$\frac{ABS}{RC}$	$\frac{DI_0}{RC}$	$\frac{ET_0}{RC}$	$\frac{TR_0}{RC}$	$PI_{ABS}$
PCA0	0,45	0,45	0,91	0,45	-0,28	0,87	-0,30	-0,48	0,47	0,94	-0,95	0,76	0,89	-0,43
PCA1	0,57	0,32	-0,12	0,31	-0,02	-0,11	-0,68	-0,81	0,61	-0,31	-0,23	-0,61	-0,44	-0,29
PCA3	-0,02	0,05	-0,04	0,48	0,86	0,25	0,04	0,04	0,029	0,03	0,06	-0,01	-0,02	0,79

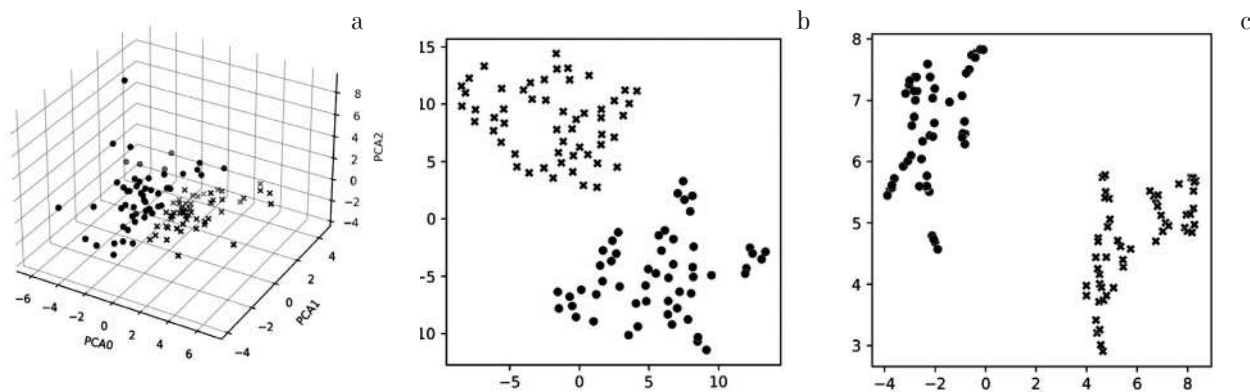


Рис. 1. Представление данных для 108 измерений без добавления токсиканта в трёхмерном пространстве с использованием преобразования PCA (а) и на плоскости с использованием преобразований PCA-t-SNE (b) и PCA-UMAP (c). Результаты разбиения на два кластера по методу *k*-средних показаны формой маркера: × – кластер 1, ● – кластер 2

Fig. 1. Representation of data for 108 measurements without the addition of a toxicant in 3D using PCA transformation (a) and on a plane using the PCA-t-SNE (b) and PCA-UMAP (c) transformations. The results of splitting into two clusters using the *k*-means method are shown by the shape of markers: × – cluster 1, ● – cluster 2

нагрузки) параметров JIP-теста в первые три главные компоненты представлены в таблице 2. Анализ вклада параметров JIP-теста не выявил параметра, который давал бы преимущественный вклад в наблюдаемый разброс, а отображение данных на трёхмерном графике в координатах первых трёх главных компонент (рис. 1а) не позволило выявить какую-либо структуру данных.

Тем не менее, дальнейшее уменьшение размерности данных с помощью нелинейных алгоритмов *t*-SNE (рис. 1b) и UMAP (рис. 1c) позволило выявить чёткое разделение набора данных на две группы. Это разделение было подтверждено кластерным анализом по методу *k*-средних. Для проверки качества кластеризации использовалось сравнение силуэт-метрики для различного количества кластеров. В итоге, наиболее высокое среднее значение силуэта для PCA совместно с *t*-SNE составило 0,6 для двух кластеров, а для PCA совместно с UMAP также для двух кластеров значение силуэта достигало 0,77. Состав кластеров (табл. 3) идентичен для преобразований PCA-t-SNE и PCA-UMAP.

Из данных таблицы 3 можно видеть, что результаты измерений распределены по кла-

стерам неравномерно по отдельным пробам и срокам инкубации. Для проб из большинства водных объектов можно отметить, что по мере увеличения срока инкубации доля измерений, отнесённых к кластеру 2, уменьшается. Для проб из трёх водных объектов (оз. Тиглицы, пруд на р. Мирожке и оз. Лесицкое) не менее половины измерений, проведённых в начале инкубации (на первых 9 ч) относятся к кластеру 1, для остальных проб большинство измерений относятся к кластеру 2.

Попарное сравнение проб по критерию Манна-Уитни (в таблице 4 приведены результаты сравнения по величине первой главной компоненты PCA0, похожие результаты получены для других главных компонент и отдельных параметров JIP-теста) позволило выделить две группы проб (выделены цветом в таблице 4), в пределах которых достоверные различия отсутствуют, и в то же время каждая проба, отнесённая к одной группе, достоверно отличается хотя бы от одной пробы другой группы. Принимая во внимание как результаты теста Манна-Уитни, так и результаты кластерного анализа, мы выдвинули гипотезу о том, что по параметрам функциональной активности

Таблица 3 / Table 3

Количество измерений, отнесённых к разным кластерам для отдельных проб, отобранных из разных водных объектов при различных сроках инкубации / Number of measurements assigned to different clusters for individual samples taken from different water bodies at different incubation periods

Водный объект Water body	Число измерений / Number of samples						Доля измерений в кластере 2, % Share of samples in cluster 2, %		
	кластер 1 cluster 1			кластер 2 cluster 2					
	0–9 ч / h	17–33 ч / h	0–33 ч / h	0–9 ч / h	17–33 ч / h	0–33 ч / h	0–9 ч / h	17–33 ч / h	0–33 ч / h
Оз. Тиглицы / Lake Tiglitsy	4	5	9	0	1	1	0	17	10
Пруд на р. Мировжке Pond of the Mirozhka River	7	5	12	1	1	2	13	17	14
Оз. Лесицкое / Lake Lesitskoe	2	4	6	2	2	4	50	33	40
Оз. Чудское / Lake Chudskoe	2	5	7	4	1	5	67	17	42
Оз. Тёплое / Lake Teploe	1	5	6	5	1	6	83	17	50
Оз. Псковское / Lake Pskovskoe	3	2	5	3	4	7	50	67	58
Оз. Калацкое / Lake Kalatskoe	0	3	3	2	3	5	100	50	63
Р. Великая (1) / The Velikaya River (1)	1	3	4	5	3	8	83	50	67
Р. Камёнка / The Kamyonka River	0	1	1	3	2	5	100	67	83
Р. Великая (2) / The Velikaya River (2)	0	1	1	6	4	10	100	80	91

Таблица 4 / Table 4

Различия между пробами, отобранными из различных водных объектов (обозначены латинскими буквами А–J), в контроле по первой главной компоненте (РСА0) на первых 33 часах инкубации (*p*-значения критерия Манна-Уитни)

Differences between samples taken from different water bodies (indicated by letters A–J) in the control for the first principal component (РСА0) at the first 33 hours of incubation (*p*-values of the Mann-Whitney test)

Водный объект Water body		Группа 1 / Group 1			Группа 2 / Group 2						
		A	B	C	D	E	F	G	H	I	J
Оз. Тиглицы Lake Tiglitsy	A	–	0,215	0,236	0,133	0,069	<b>0,026</b>	0,053	<b>0,022</b>	0,058	$4,37 \cdot 10^{-5}$
Пруд на р. Мировжке Pond of the Mirozhka River	B	0,215	–	0,309	0,103	<b>0,030</b>	<b>0,011</b>	<b>0,030</b>	<b>0,007</b>	0,045	$2,17 \cdot 10^{-5}$
Оз. Лесицкое Lake Lesitskoe	C	0,236	0,309	–	0,115	<b>0,026</b>	<b>0,008</b>	<b>0,014</b>	<b>0,014</b>	<b>0,029</b>	$4,37 \cdot 10^{-5}$
Оз. Чудское Lake Chudskoe	D	0,133	0,103	0,115	–	0,454	0,364	0,394	0,167	0,474	<b>0,008</b>
Оз. Тёплое Lake Teploe	E	0,069	<b>0,030</b>	<b>0,026</b>	0,454	–	0,185	0,443	0,118	0,444	$7,79 \cdot 10^{-5}$
Оз. Псковское Lake Pskovskoe	F	<b>0,026</b>	<b>0,011</b>	<b>0,008</b>	0,364	0,185	–	0,253	0,292	0,372	<b>0,003</b>
Оз. Калацкое Lake Kalatskoe	G	0,053	<b>0,030</b>	<b>0,014</b>	0,394	0,443	0,253	–	0,107	0,481	$4,87 \cdot 10^{-5}$
Р. Великая (1) The Velikaya River (1)	H	<b>0,022</b>	<b>0,007</b>	<b>0,014</b>	0,167	0,118	0,292	0,107	–	0,187	0,107
Р. Камёнка The Kamyonka River	I	0,058	<b>0,045</b>	<b>0,029</b>	0,474	0,444	0,372	0,481	0,187	–	<b>0,007</b>
Р. Великая (2) The Velikaya River (2)	J	$4,37 \cdot 10^{-5}$	$2,17 \cdot 10^{-5}$	$4,37 \cdot 10^{-5}$	<b>0,008</b>	$7,79 \cdot 10^{-5}$	<b>0,003</b>	$4,87 \cdot 10^{-5}$	0,107	<b>0,007</b>	–

Примечание: полужирным шрифтом выделены различия, достоверные при уровне значимости 0,05. Прочерк обозначает, что сравнение пробы с самой собой не проводится. Серым цветом выделены группы проб, достоверные различия между которыми отсутствуют.

Note: Values in bold represent differences significant at a significance level of 0.05. Dash means that the comparison of a sample with itself was not performed. Groups of samples between which there are no significant differences are marked in gray.

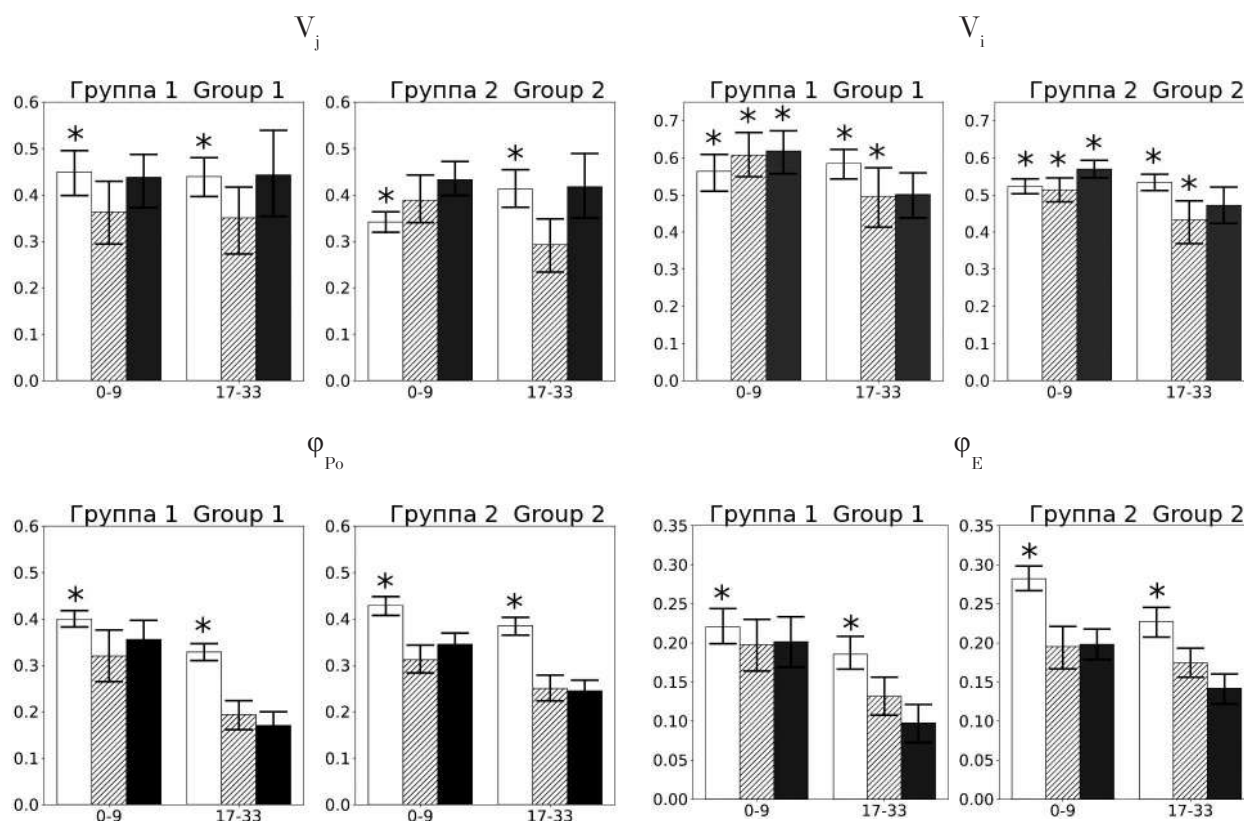


Рис. 2. Средние значения основных параметров JIP-теста.

Контроль – белый, инкубация с сульфатом кадмия – штриховка, инкубация с дихроматом калия – тёмно-серый. Отрезками показаны выборочные стандартные отклонения для параметров. Звёздочкой отмечены значения, достоверно различающиеся между группами по критерию Манна-Уитни при уровне значимости 0,05

Fig. 2. The average values of the main JIP test parameters. Control – white, incubated with cadmium sulfate – hatched, incubated with potassium dichromate – dark gray.

Bars show sample standard deviations for parameters. An asterisk indicates values that significantly differ between groups according to the Mann-Whitney test at a significance level of 0.05

ФСА анализируемые пробы можно разделить на две группы. Пробы, отобранные из оз. Тиглицы, пруда р. Мирожки и оз. Лесицкое (А–С), мы обозначили как группа 1, остальные (D–J) – группа 2.

Различия между двумя предполагаемыми группами по основным параметрам активности фотосинтетического аппарата ( $V_j$ ,  $V_i$ ,  $\phi_{Po}$ ,  $\phi_{Eo}$ ) в контроле являются достоверными при уровне значимости 0,05 (рис. 2). При действии ТМ происходит снижение максимального квантового выхода первичной фотохимической реакции  $\phi_{Po}$  и максимального квантового выхода электронного транспорта  $\phi_{Eo}$ . В пробах, относящихся к группе 2, это снижение явно выражено уже на первых часах инкубации с ТМ, в то время как в пробах, относящихся к группе 1, оно проявляется только после 17 ч инкубации. Это свидетельствует о разной динамике развития токсического эффекта в этих группах проб. Следует отметить, что как  $\phi_{Po}$ , так и  $\phi_{Eo}$  проб группы 1 достоверно ниже по сравнению с группой 2, что может указывать

на то, что даже в контроле ФСА микроводорослей находится в угнетённом состоянии. Это может быть связано с антропогенной нагрузкой на эти водные объекты: пруд на р. Мирожке находится в черте г. Пскова, а озёра Тиглицы и Лесицкое – в рекреационных зонах.

### Заключение

Исследование фотосинтетических характеристик проб фитопланктона из 9 природных водоёмов Псковской области показало, что весь массив данных можно разделить на две группы, одна из которых характеризуется более высокой, а другая – более низкой фотосинтетической активностью. Сочетание методов машинного обучения с традиционными статистическими методами было использовано для выявления в исследуемом массиве данных неявных закономерностей влияния тяжёлых металлов на фитопланктон. Показано, что в пробах с изначально низкой активностью ФСА токсическое действие тяжёлых металлов

проявляется на более поздних сроках инкубации по сравнению с пробами с изначально высокой активностью ФСА. Предложенный подход к анализу данных может быть легко масштабирован для анализа больших массивов экспериментальных данных, получаемых с помощью автономных станций экологического мониторинга, что делает его перспективным инструментом для раннего обнаружения токсического загрязнения природных вод.

*Исследование выполнено при поддержке грантов РФФ №№ 23-24-00353 и 22-11-00009.*

## Литература

1. Водка М.В., Полищук А.В., Белявская Н.А., Золотарёва Е.К. Действие тяжёлых металлов на фотосинтетический аппарат и активность карбоангидразы хлоропластов гороха // Вісник Харківського національного аграрного університету. Серія біологія. 2013. № 3 (30). С. 46–55.

2. Гонарчук Е.А., Загоскина Е.В. Тяжёлые металлы: поступление, токсичность и защитные механизмы растений (на примере ионов кадмия) // Вісник Харківського національного аграрного університету. Серія біологія. 2017. № 1 (40). С. 35–49.

3. Розенцвиг О.А., Нестеров В.Н., Синютина Н.Ф. Изменения в составе липидов мембран клеток и субклеточных фракций пресноводного растения *Hydrilla verticillata* (L. Fil.) Royle под действием ионов тяжёлых металлов // Самарская Лука: проблемы региональной и глобальной экологии. 2010. Т. 19. № 1. С. 61–77.

4. Todorenko D., Timofeev N., Kovalenko I., Kukaskikh G., Matorin D., Antal T. Chromium effects on photosynthetic electron transport in pea (*Pisum sativum* L.) // Planta. 2020. V. 251. Article No. 11.

5. Todorenko D., Volgusheva A., Timofeev N., Kovalenko I., Matorin D., Antal T. Multiple *in vivo* effects of cadmium on photosynthetic electron transport in pea plants // Photochemistry and Photobiology. 2021. V. 97. No. 6. P. 1516–1526.

6. Strasser R.J., Tsimilli-Michael M., Srivastava A. Analysis of the chlorophyll *a* fluorescence transient // Chlorophyll *a* fluorescence: a signature of photosynthesis. Advances in Photosynthesis and Respiration. V. 19 / Eds. G.C. Papageorgiou, Govindjee. Dordrecht: Springer, 2004. P. 321–362.

7. Öz M.T., Turan Ö., Kayihan C., Eyidoğan F., Ekmeççi Y., Yücel M., Öktem H.A. Evaluation of photosynthetic performance of wheat cultivars exposed to boron toxicity by the JIP fluorescence test // Photosynthetica. 2014. V. 52. P. 555–563.

8. Heerden P.D.R., Tsimilli-Michael M., Kruger G.H.J., Strasser R.J. Dark chilling effects on soybean genotypes during vegetative development: parallel studies of CO<sub>2</sub>

assimilation, chlorophyll *a* fluorescence kinetics O-J-I-P and nitrogen fixation // Physiologia Plantarum. 2003. V. 117. P. 476–491.

9. Stefanov D., Petkova V., Denev. I.D. Screening for heat tolerance in common bean (*Phaseolus vulgaris* L.) lines and cultivars using JIP-test // Scientia Horticulturae. 2011. V. 128. P. 1–6.

10. Jiang H.-X., Tang N., Zheng J.-G., Chen L.-S. Antagonistic actions of boron against inhibitory effects of aluminum toxicity on growth, CO<sub>2</sub> assimilation, ribulose-1,5-bisphosphate carboxylase/oxygenase, and photosynthetic electron transport probed by the JIP-test, of *Citrus grandis* seedlings // BMC Plant Biology. 2009. V. 9. Article No. 102.

11. Swoczyna T., Łata B., Stasiak A., Stefaniak J., Latocha P. JIP-test in assessing sensitivity to nitrogen deficiency in two cultivars of *Actinidia arguta* (Siebold et Zucc.) Planch. ex Miq. // Photosynthetica. 2019. V. 57. No. 2. P. 646–658.

12. Khruschev S.S., Plyusnina T.Yu., Antal T.K., Pogosyan S.I., Riznichenko G.Yu., Rubin A.B. Machine learning methods for assessing photosynthetic activity: environmental monitoring applications // Biophysical Reviews. 2022. V. 14. P. 821–842.

13. Хрущев С.С., Дрозденко Т.В., Плюснина Т.Ю., Тимофеев И.В., Тодоренко Д.А., Тихомирова Е.И., Антал Т.К. Выявление токсического воздействия тяжёлых металлов на фитопланктон с помощью нейросетевого анализа индукционных кривых флуоресценции хлорофилла // Теоретическая и прикладная экология. 2021. № 2. С. 134–141.

14. Hotelling H. Analysis of a complex of statistical variables into principal components // Journal of Educational Psychology. 1933. V. 24. P. 417–441.

15. van der Maaten L., Hinton G. Visualizing Data using t-SNE // Journal of Machine Learning Research. 2008. V. 9. P. 2579–2605.

16. McInnes L., Healy J. UMAP: Uniform manifold approximation and projection for dimension reduction [Электронный ресурс] <https://arxiv.org/abs/1802.03426> (Дата обращения: 07.04.2023).

## References

1. Vodka M.V., Polishchuk A.V., Belyavskaya N.A., Zolotareva E.K. The effect of heavy metals on the photosynthetic apparatus and the activity of carbonic anhydrase in pea chloroplasts // Вісник Харківського національного аграрного університету. Серія біологія. 2013. No. 3 (30). P. 46–55 (in Russian).

2. Gonarchuk E.A., Zagoskina E.V. Heavy metals: intake, toxicity and defense mechanisms of plants (on the example of cadmium ions) // Вісник Харківського національного аграрного університету. Серія біологія. 2017. No. 1 (40). P. 35–49 (in Russian).

3. Rozentsvet O.A., Nesterov V.N., Sinyutina N.F. Changes in the lipid composition of cell membranes and

subcellular fractions of the freshwater plant *Hydrilla verticillata* (L. Fil.) Royle under the influence of heavy metal ions // Samarskaya Luka: problemy regionalnoy i globalnoy ekologii. 2010. V. 19. No. 1. P. 61–77 (in Russian).

4. Todorenko D., Timofeev N., Kovalenko I., Kukarskikh G., Matorin D., Antal T. Chromium effects on photosynthetic electron transport in pea (*Pisum sativum* L.) // Planta. 2020. V. 251. Article No. 11. doi: 10.1007/s00425-019-03304-1

5. Todorenko D., Volgusheva A., Timofeev N., Kovalenko I., Matorin D., Antal T. Multiple *in vivo* effects of cadmium on photosynthetic electron transport in pea plants // Photochemistry and Photobiology. 2021. V. 97. No. 6. P. 1516–1526. doi: 10.1111/PHP.13469

6. Strasser R.J., Tsimilli-Michael M., Srivastava A. Analysis of the chlorophyll *a* fluorescence transient // Chlorophyll *a* fluorescence: a signature of photosynthesis. Advances in Photosynthesis and Respiration. V. 19 / Eds. G.C. Papageorgiou, Govindjee. Dordrecht: Springer, 2004. P. 321–362. doi: 10.1007/978-1-4020-3218-9\_12

7. Öz M.T., Turan Ö., Kayihan C., Eyidoğan F., Ekmekçi Y., Yücel M., Öktem H.A. Evaluation of photosynthetic performance of wheat cultivars exposed to boron toxicity by the JIP fluorescence test // Photosynthetica. 2014. V. 52. P. 555–563. doi: 10.1007/s11099-014-0065-2

8. Heerden P.D.R., Tsimilli-Michael M., Kruger G.H.J., Strasser R.J. Dark chilling effects on soybean genotypes during vegetative development: parallel studies of CO<sub>2</sub> assimilation, chlorophyll *a* fluorescence kinetics O-J-I-P and nitrogen fixation // Physiologia Plantarum. 2003. V. 117. P. 476–491. doi: 10.1034/j.1399-3054.2003.00056.x

9. Stefanov D., Petkova V., Denev. I.D. Screening for heat tolerance in common bean (*Phaseolus vulgaris* L.) lines and cultivars using JIP-test // Scientia Horticulturae. 2011. V. 128. P. 1–6. doi: 10.1016/j.scienta.2010.12.003

10. Jiang H.-X., Tang N., Zheng J.-G., Chen L.-S. Antagonistic actions of boron against inhibitory effects of aluminum toxicity on growth, CO<sub>2</sub> assimilation, ribulose-1,5-bisphosphate carboxylase/oxygenase, and photosynthetic electron transport probed by the JIP-test, of *Citrus grandis* seedlings // BMC Plant Biology. 2009. V. 9. Article No. 102. doi: 10.1186/1471-2229-9-102

11. Swoczyna T., Łata B., Stasiak A., Stefaniak J., Latocha P. JIP-test in assessing sensitivity to nitrogen deficiency in two cultivars of *Actinidia arguta* (Siebold et Zucc.) Planch. ex Miq. // Photosynthetica. 2019. V. 57. No. 2. P. 646–658. doi: 10.32615/ps.2019.057

12. Khrushchev S.S., Plyusnina T.Yu., Antal T.K., Pogoryan S.I., Riznichenko G.Yu., Rubin A.B. Machine learning methods for assessing photosynthetic activity: environmental monitoring applications // Biophysical Reviews. 2022. V. 14. P. 821–842. doi: 10.1007/s12551-022-00982-2

13. Khrushchev S.S., Drozdenko T.V., Plyusnina T.Yu., Timofeev I.V., Todorenko D.A., Tikhomirova E.I., Antal T.K. Identification of the toxic effects of heavy metals on phytoplankton using neural network analysis of chlorophyll fluorescence induction curves // Theoretical and Applied Ecology. 2021. No. 2. P. 134–141 (in Russian). doi: 10.25750/1995-4301-2021-2-134-141

14. Hotelling H. Analysis of a complex of statistical variables into principal components // Journal of Educational Psychology. 1933. V. 24. P. 417–441. doi: 10.1037/h0071325

15. van der Maaten L., Hinton G. Visualizing data using t-SNE // Journal of Machine Learning Research. 2008. V. 9. P. 2579–2605.

16. McInnes L., Healy J. UMAP: Uniform manifold approximation and projection for dimension reduction [Internet resource] <https://arxiv.org/abs/1802.03426> (Accessed: 07.04.2023). doi: 10.48550/arXiv.1802.03426

## Мониторинг стойких органических загрязнителей в промысловых рыбах Российской Арктики

© 2023. Ю. И. Варакина, аспирант, А. С. Аксёнов, к. т. н., профессор,  
Д. Е. Лахманов, к. х. н., с. н. с., Т. Ю. Сорокина, к. ю. н., с. н. с.,  
Л. Ф. Попова, д. б. н., профессор,

Северный (Арктический) федеральный университет имени М. В. Ломоносова,  
163002, Россия, г. Архангельск, набережная Северной Двины, д. 17,  
e-mail: yu.varakina@narfu.ru

В статье обсуждаются результаты анализа стойких органических загрязнителей (СОЗ) в промысловых видах рыб (атлантический лосось (сёмга) *Salmon salar*, азиатская корюшка *Osmerus dentex* Steindachner et Kner, сельдь *Clupea* sp., арктический голец *Salvelinus alpinus*), обитающих на территории Ненецкого автономного округа (НАО) и используемых в рационе питания жителями Российской Арктики. Данное исследование закладывает основу проведения мониторинга СОЗ в традиционных продуктах питания с учётом норм суточного потребления и возможных рисков, которые могут оказывать влияние на здоровье человека в Арктике. Авторы определили временные тренды содержания СОЗ в арктических видах рыб, а также провели анализ и сравнение опубликованных данных о СОЗ в традиционных пищевых продуктах Арктического региона. В исследуемых образцах рыб среди СОЗ доминировали p,p'-ДДЕ, ПХБ 153 и гексахлорбензол, что соответствует тенденциям накопления органических загрязнителей в арктических гидробионтах. Суммарное содержание СОЗ в сёмге, сельди, арктическом гольце и азиатской корюшке составляли 15,01; 7,89; 2,38; 2,02 нг/г сырого веса соответственно, что в десятки-сотни раз ниже установленных нормативных значений. Для всех изучаемых видов рыб, в количестве не менее 7 образцов, соотношение ДДЕ/ДДТ было высоким, что свидетельствует о раннем загрязнении ДДТ мест обитания рыб. Сёмга и сельдь являются наиболее загрязнёнными видами рыб по всему перечню изучаемых соединений. Отмечено снижение концентрации СОЗ в изучаемых видах рыб в сравнении с более ранними исследованиями, проведёнными на схожих территориях. Несмотря на большое количество рыбы в рационе жителей НАО, существенных рисков для здоровья населения выявлено не было. Однако было показано, что уровень ПХБ в концентрациях ниже предельно допустимых несёт потенциальный риск возникновения онкозаболеваний, особенно при потреблении сёмги более 45 г/сут местным населением в одном из посёлков НАО.

**Ключевые слова:** полихлорированные бифенилы, пестициды, промысловые виды рыб, Ненецкий автономный округ, Арктика, экологический риск.

## Monitoring of persistent organic pollutants in commercial fish in the Russian Arctic

© 2023. Yu. I. Varakina ORCID: 0000-0002-7531-9193<sup>†</sup>

A. S. Aksenov ORCID: 0000-0003-1013-1357<sup>†</sup> D. E. Lakhmanov ORCID: 0000-0001-9940-4862<sup>†</sup>

T. Yu. Sorokina ORCID: 0000-0002-4873-8747<sup>†</sup> L. F. Popova ORCID: 0000-0003-1650-6797<sup>†</sup>

Northern (Arctic) Federal University Named after M. V. Lomonosov,  
17, Naberezhnaya Severnoy Dviny, Arkhangelsk, Russia, 163002,  
e-mail: yu.varakina@narfu.ru

The manuscript discusses the results of the analysis of persistent organic pollutants (POPs) in commercial fish species (atlantic salmon *Salmo salar*, rainbow smelt *Osmerus dentex* Steindachner et Kner, herring *Clupea* sp., arctic char *Salvelinus alpinus*) living in the waters of the Nenets Autonomous Okrug (NAO) and used in the diet nutrition of the inhabitants of the Russian Arctic. This study lays the foundation for monitoring of POPs, taking into accounts the possible risks and norms of daily consumption of traditional foods that affect human health in the Arctic. The authors determined the temporal trends in the content of POPs in Arctic fish species, as well as analyzed and compared published data on the content of POPs in traditional food. In the studied fish samples, p,p'-DDE, PCB 153 and hexachlorobenzene dominated among POPs, which corresponds to the trends in the accumulation of organic pollutants in Arctic hydrobionts. The total content of POPs in atlantic salmon, herring, arctic char and rainbow smelt was 15,01; 7,89; 2,38; 2,02 ng/g wet weight, respectively, which is tens to hundreds times lower than the established standard values. For all fish species, in the amount of at least 7 samples, the DDE/DDT ratio was high, which indicates early DDT contamination of fish habitats. Atlantic salmon and herring are the most contaminated fish species in the entire list of studied

compounds. A decrease of POPs concentration in the studied fish species was noted in comparison with earlier studies conducted in similar areas. Despite the large amount of fish in the diet of peoples from the NAO, no significant risks have been identified. However, it was found that the level of PCBs in concentrations below the MPC carries a potential risk of cancer, especially with long-term consumption of atlantic salmon more than 45 g/day by the local population in one of the settlements of the NAO.

**Keywords:** polychlorinated biphenyls, pesticides, commercial fish species, Nenets Autonomous Okrug, Arctic, ecological risk.

С каждым годом всё большей антропогенной нагрузке подвергаются уникальные, хрупкие арктические территории. Негативному воздействию, прежде всего, подвержены биологические объекты [1, 2], следовательно, жизнь коренных народов и местного населения в Арктическом регионе находится под угрозой, так как значительная часть их рациона питания состоит из мигрирующих видов рыб и птиц, мяса и жира диких наземных и морских животных. Исследования показали, что до 80% высокотоксичных загрязнений поступает в результате употребления именно такой традиционной пищи [1, 2].

Отдельного изучения требуют глобальные загрязняющие вещества арктических пищевых цепей – стойкие органические загрязнители (СОЗ) [3–6]. Данные соединения активно использовались как синтетические ядовитые вещества в борьбе с вредителями и болезнями, в растениеводстве, а также в промышленности [7, 8]. Являясь суперэкоотоксикантами, они негативно влияют на здоровье человека и окружающую среду даже в тех регионах, где они никогда не производились, попадая туда посредством атмосферной циркуляции и трансграничного переноса [9–11].

Первые комплексные мониторинговые исследования СОЗ в Российской Арктике проводились в 2001–2004 гг. на территории Ненецкого (НАО) и Чукотского автономных округов, Кольского и Таймырского полуостровов [16]. После этого периода в литературе доступны только фрагментарные данные по содержанию СОЗ в различных видах традиционной пищи (рыба, птица, кит, тюлень, морж) населения Российской Арктики [12, 13].

Данное исследование является частью большого проекта, в рамках которого НАО был выбран в качестве пилотного региона для внедрения разработанной системы биомониторинга. Во-первых, вся его территория находится в Арктической зоне Российской Федерации (РФ). Во-вторых, в округе активно осуществляется добыча [14, 15]. В-третьих, мониторинговые исследования СОЗ в биологических объектах этого региона начались с 2000-х гг. В тот период основным районом ис-

следования в НАО был п. Нельмин-Нос [16]. Также в 1997–2008 гг. проводились исследования в бассейне реки Печора по выявлению проблем здоровья рыб в зависимости от уровня содержания СОЗ [17].

В 2017 г. в САФУ им. М.В. Ломоносова (г. Архангельск) создана лаборатория арктического биомониторинга, научным коллективом которой получен большой массив данных биологического мониторинга [18, 19], в том числе по содержанию СОЗ в арктических пищевых цепях [20–22].

На основе исследования продуктов питания среди населения семи сельских поселений региона ( $n = 297$ ) было выявлено восемь приоритетных видов рыб следующих семейств: лососёвые Salmonidae (сёмга, горбуша, арктический голец, сиг-пыжьян), сельдевые Clupea (сельдь), тресковые Gadidae (навага), корюшковые Osmeridae (азиатская корюшка), щуковые Esocidae (щука), являющиеся основным источником питательных веществ [19]. Первые результаты были опубликованы по пяти наиболее потребляемым коренными и местными жителями п. Индига (НАО) видам рыб. Максимальные концентрации были выявлены у горбуши *Oncorhynchus gorbuscha* и наваги *Eleginus nawaga* [20]. В настоящем исследовании представлены результаты по содержанию приоритетных СОЗ в мышечной ткани четырёх видов рыб: атлантический лосось (сёмга) *Salmon salar*, арктический голец *Salvelinus alpinus*, азиатская корюшка *Osmerus dentex* Steindachner et Kner, сельдь *Clupea* sp., которые дополняют и вносят новые, в том числе географические аспекты в предыдущие исследования.

Целью данного исследования было определение содержания СОЗ в промысловых видах рыб НАО и оценка их безопасности (риск здоровья человека) для жителей в случае длительного потребления в пищу.

### Объекты и методы исследования

Исследования проводили в период с мая 2018 по сентябрь 2020 г. на территории НАО. В рамках полевых работ отбор проб рыб, как



продукта традиционного питания, осуществляли в Индигской губе Баренцева моря, в р. Печора (близ п. Красное) и у о. Колгуев (близ п. Бугрино) в Баренцевом море совместно с местным населением по утверждённым методикам (ГОСТ 7631-2008, ГОСТ 31339-2006). Было выловлено четыре вида рыб: атлантический лосось (сёмга) *Salmo salar*, азиатская корюшка *Osmerus dentex* Steindachner et Kner, сельдь *Clupea* sp. и арктический голец *Salvelinus alpinus*. Основной отбор проб проходил в Индигской губе Баренцева моря, где были выловлены все четыре вида рыбы. Дополнительно отбор был проведён ещё на двух участках, которые являются наиболее распространёнными местами обитания соответствующих видов рыб. Так, в р. Печора удалось отобрать сёмгу ( $n = 2$ ), а вблизи п. Бугрино о. Колгуев – арктического гольца ( $n = 5$ ). Единичные пробы из различных водных объектов были объединены в общую выборку в зависимости от вида рыб. После отлова каждый образец герметично упаковывали в пищевую плёнку и в замороженном состоянии транспортировали (ГОСТ 32366-2013) в лабораторию арктического биомониторинга САФУ (г. Архангельск). Для каждой особи был определён вид, пол, вес, длина по Смиту, возраст, влажность и общее содержание липидов согласно ГОСТ 1368-2003, ГОСТ 26829-86 и методиками, описанным в работе [20].

Определение содержания СОЗ осуществляли методом газовой хромато-масс-спектрометрии на приборе Agilent 7890А, оснащённом тройной квадрупольной системой MS/MS Agilent серии 7000 (США) в Центре коллективного пользования научным оборудованием «Арктика» САФУ и на базе научно-образовательного центра мирового уровня «Российская Арктика: новые материалы, технологии и методы исследования» в мышечной ткани, как основного компонента, используемого в питании, по методике, описанной в работе [20]. Для анализа было выбрано 28 соединений из перечня, закреплённого Стокгольмской конвенцией о СОЗ 2001 г. [9]: 11 ПХБ (28, 52, 101, 105, 118, 123, 128, 138, 153, 180, 183) и 17 ХОП ( $\alpha$ -гексахлорциклогексана ( $\alpha$ -ГХЦГ),  $\beta$ -ГХЦГ,  $\gamma$ -гексахлорциклогексана ( $\gamma$ -ГХЦГ),  $p,p'$ -дихлордифенил-дихлорэтилена ( $p,p'$ -ДДЕ),  $o,p'$ -дихлордифенил-дихлорэтилена ( $o,p'$ -ДДЕ),  $p,p'$ -дихлордифенилтрихлорметилметана ( $p,p'$ -ДДД),  $o,p'$ -дихлордифенилтрихлорметилметана ( $o,p'$ -ДДД), ГХБ, цис-нонахлора, транс-нонахлора, цис-хлордана, транс-хлордана,

мирекса, альдрина 1,2,3,5-тетрахлорбензола (1,2,3,5-ТХБ), 1,2,4,5-тетрахлорбензола (1,2,4,5-ТХБ) и  $\beta$ -гептахлорэпоксида.

Особенности содержания исследуемых соединений в промысловых видах рыб НАО выявляли путём сравнения с данными, представленными в научной литературе [12, 16, 23], и с утверждёнными предельно допустимыми значениями, закреплёнными в российских нормативных документах СанПиН 2.3.2.1078-01, ТР ТС 021/2011 и ТР ЕАЭС 040/2016.

Для оценки риска здоровью человека при длительном потреблении исследуемых рыб использовали систему коэффициентов: коэффициент опасности для загрязняющего вещества ( $HQ$ ) и коэффициент дополнительного риска возникновения рака в течение жизни ( $ILCR$ ) для оценки экологического риска от СОЗ для человека при потреблении исследуемых видов рыб. Показатель  $HQ$  рассчитывали по формуле (1):

$$HQ = D_{\text{приёма пищи}} / TDI, \quad (1)$$

где  $HQ$  – коэффициент опасности (%),  $D_{\text{приёма пищи}}$  – количество вещества токсиканта, попавшего в организм человека с пищей (мг/кг в день),  $TDI$  – коэффициент переносимого суточного потребления неканцерогенных веществ (мг/кг в день) [24].

Показатель доза приёма пищи  $D_{\text{приёма пищи}}$  определяли по формуле (2) [24]:

$$D_{\text{приёма пищи}} = \left[ \frac{C_{\text{в пище}} \cdot IR_{\text{пищи}} \cdot AFGIT \cdot N_{\text{дней}} \cdot N_{\text{лет}}}{m_{\text{рецептора}} \cdot 365 \cdot ОПЖ} \right], \quad (2)$$

где  $D_{\text{приёма пищи}}$  – количество вещества (канцерогена или токсиканта), попавшего в организм человека с пищей (мг/кг в день),  $C_{\text{в пище}}$  – максимальная концентрация загрязняющего вещества в продукте питания (мг/кг),  $IR_{\text{пищи}}$  – скорость приёма пищи (кг в день),  $AFGIT$  – коэффициент всасывания желудочного-кишечного тракта, равный 1,  $N_{\text{дней}}$  – количество дней в году, в течение которых потребляется пища (0–365 дней),  $N_{\text{лет}}$  – количество лет воздействия (не используется для неканцерогенных веществ),  $m_{\text{рецептора}}$  – масса тела рецептора (кг),  $ОПЖ$  – ожидаемая продолжительность жизни (в годах) (не используется для неканцерогенных веществ). Для НАО, согласно переписи населения, составляет 71,4 лет.

Показатель дополнительного риска возникновения рака в течение жизни ( $ILCR$ ) определяли по формуле (3) [25]:

$$ILCR = D_{\text{приёма пищи}} \cdot Fr, \quad (3)$$

где  $ILCR$  – показатель оценки дополнительного риска вероятности развития онкозаболевания при поступлении потенциального канцерогена в течение всей жизни,  $Fr$  – коэффициент наклона прямой (Slope Factor) для загрязняющих веществ (мг/(кг · день)).

Эксперименты проводили с использованием сертифицированного образца мышечной ткани рыб с известным содержанием СОЗ (IAEA-406, IAEA, Вена, Австрия). Обработку полученных данных осуществляли с применением пакета программного обеспечения SPSS, версия 23.0 (IBM Corp., Армонк, Нью-Йорк, США). Распределение числовых данных оценивали с помощью тестов Шапиро-Уилка. Все значения ниже предела количественного обнаружения (ПКО) принимали равными ПКО. Двухстороннее значение  $p < 0,05$  считалось статистически значимым.

### Результаты и обсуждение

В ходе количественного химического анализа содержания СОЗ в четырёх промысловых видах рыб, используемых в питании местными жителями НАО, были обнаружены 11 соединений ПХБ, 4 метаболита ДДТ, ГХБ и 9 хлорорганических пестицидов (ХОП). Во всей изученной выборке образцов мышечной ткани рыб содержание альдрина,  $\beta$ -гептахлорэпоксида, ПХБ 123 было ниже ПКО (табл. 1).

В РФ из большого перечня СОЗ в рыбной продукции, согласно действующим гигиеническим нормативам, регламентируется только три группы соединений:  $\Sigma$ ПХБ,  $\Sigma$ ДДТ и  $\Sigma$ ГХЦГ. Их значения не должны превышать 2000; 300 и 200 нг/г сырого веса соответственно. Полученные уровни СОЗ в рыбах НАО являются низкими относительно утверждённых ПДК для трёх групп соединений.

Доминирующими СОЗ в анализированных образцах рыб были ПХБ, метаболиты ДДТ и ГХБ, что также было обнаружено в других подобных исследованиях [26]. Самыми распространёнными токсикантами в мышцах рыб являются ПХБ. Во всех исследуемых образцах средняя концентрация суммы 10 конгенов ПХБ находилась в диапазоне 1,10–4,92 нг/г сырого веса, при этом максимальное значение характерно для одного из образцов сёмги, где средний уровень  $\Sigma$ ПХБ<sub>10</sub> составлял 10,05 нг/г сырого веса. Следует отметить, что данный уровень в 200 раз ниже нормативных значений ПДК. Минимальные концентрации  $\Sigma$ ПХБ<sub>10</sub> при-

существовали в мышечной ткани арктического гольца и азиатской корюшки (менее 1,25 нг/г сырого веса).

В целом во всех изучаемых видах рыб присутствуют как маркерные ПХБ (153, 128, 138, 28, 101), так и диоксиноподобные соединения (ПХБ 118, 105). Данные группы соединений используются для оценки загрязнённости окружающей среды и биообъектов [27], которые являются соединениями антропогенного характера, входящими в состав технической смеси типа Aroclor (Совол – конденсаторное масло и Совтол – трансформаторное масло) [28]. Данная смесь до сих пор используется в России в качестве диэлектриков в трансформаторах и конденсаторах, в гидравлических системах, входит в состав смазочных и охлаждающих масел, лакокрасочных изделий для судов и т. д.

Доминирующим соединением для всех исследуемых образцов рыб был ПХБ 153 с максимальным уровнем содержания у сёмги (1,08 нг/г сырого веса), к такому же выводу пришли и учёные при исследовании рыб других территорий, таких как Азия, Африка, Западная Европа [20]. В сёмге, сельди и азиатской корюшке уровень содержания ПХБ 153 и ПХБ 138 был примерно одинаковый, и составил в среднем 1,05; 0,84 и 0,29 нг/г сырого веса в соответствие с таблицей 1. Для арктического гольца, наряду с высоким содержанием ПХБ 153, характерно доминирование ПХБ 128, что в 1,3–4,6 раза выше по сравнению с содержанием этого соединения в других видах рыб НАО. Другие конгены ПХБ в исследуемых образцах содержатся в меньших количествах.

В сельди, несмотря на низкое содержание липидов (от 0,71 до 1,30%) по сравнению с арктическим гольцом и азиатской корюшкой, уровень данных соединений в 3 раза выше. Сравнительный анализ полученного уровня СОЗ в лососёвых видах рыб с ранее опубликованными результатами [12] показывает, что концентрация конгенов  $\Sigma$ ПХБ у рыб из НАО была в целом ниже, чем у рыб из Печенегского района в 2013 г.

Выявленные различия в уровнях содержания доминирующих ПХБ среди изучаемых видов рыб могут зависеть от биологических особенностей особей (видовое разнообразие, кормовая база, направленность метаболических процессов, места нагула и т. д.), а также от разной степени загрязнённости СОЗ разных звеньев пищевой цепи, что требует дополнительных исследований.

Таблица 1 / Table 1

Характеристика и результаты химического анализа промысловых видов рыб Ненецкого автономного округа (среднее значение, в скобках указан диапазон)  
Characteristics and results of chemical analysis of commercial fish species of the Nenets Autonomous Okrug (average value, the range is indicated in parentheses)

Параметр Parameter	Вид / Species			
	сёмга <i>Salmo salar</i> atlantic salmon	арктический голец <i>Salvelinus alpinus</i> arctic char	азиатская корюшка <i>Osmerus dentex</i> Steindachner et Kner rainbow smelt	сельдь <i>Clupea</i> sp. herring
Количество проб Number of samples	7	15	15	11
Возраст, годы Age, yearh	4 (1,29–8,60)	0,70 (0,47–1,05)	0,10 (0,07–0,14)	0,093 (0,08–0,10)
Вес, кг / Weight, kg	3+ (1+–7+)	4+ (3+–6+)	6+ (4+–9)	4+ (3+–4+)
Содержание липидов, % / Lipid, %	5,57 (1,21–14,45)	1,07 (0,05–3,30)	1,29 (0,89–2,17)	1,07 (0,71–1,30)
Полихлорированные бифенилы, нг/г сырого веса / Polychlorinated biphenyls, ng/g weit weight				
ПХБ 28 / PCB 28	0,52 (0,05–1,00)	0,11 (< ПКО–0,26)	0,08 (< ПКО–0,16)	0,33 (0,28–0,41)
ПХБ 52 / PCB 52	0,38 (0,03–0,87)	0,06 (< ПКО–0,13)	0,08 (< ПКО–0,12)	0,23 (0,22–0,25)
ПХБ 101/ PCB 101	0,51 (< ПКО–1,22)	0,16 (< ПКО–0,36)	0,05 (< ПКО–0,14)	0,48 (0,42–0,57)
ПХБ 105/ PCB 105	0,21 (0,03–0,47)	0,03 (0,02–0,08)	0,06 (0,02–0,13)	0,21 (0,19–0,24)
ПХБ 118/ PCB 118	0,72 (0,05–1,58)	0,13 (< ПКО–0,24)	0,16 (< ПКО–0,35)	0,57 (0,47–0,70)
ПХБ 128/ PCB 128	0,17 (0,03–0,37)	0,23 (0,02–0,08)	0,05 (0,01–0,10)	0,13 (0,13–0,14)
ПХБ 138/ PCB 138	1,03 (0,21–2,12)	0,05 (< ПКО–0,32)	0,27 (0,03–0,56)	0,84 (0,73–0,98)
ПХБ 153/ PCB 153	1,08 (0,24–2,16)	0,43 (0,04–0,93)	0,30 (0,03–0,58)	0,85 (0,72–1,05)
ПХБ 180/ PCB 180	0,24 (0,07–0,44)	0,03 (< ПКО–0,18)	0,04 (< ПКО–0,09)	0,16 (0,12–0,19)
ПХБ 183/ PCB 183	0,06 (0,01–0,11)	0,01 (< ПКО–0,03)	0,01 (< ПКО–0,03)	0,04 (0,02–0,05)
Хлорорганические пестициды, нг/г сырого веса / Chlorineorganic pesticides, ng/g weit weight				
р,р'-ДДЕ / р,р'-DDE	2,19 (0,37–4,80)	0,43 (< ПКО–0,94)	0,20 (< ПКО–0,58)	1,20 (1,01–1,53)
о,р'-ДДД / о,р'-DDD	0,02 (< ПКО–0,05)	0,02 (< ПКО–0,07)	–	–
р,р'-ДДД / р,р'-DDD	0,8 (0,17–1,45)	0,05 (< ПКО–0,19)	0,05 (< ПКО–0,14)	0,44 (0,41–0,49)
о,р'-ДДЕ / о,р'-DDE	0,06 (< ПКО–0,17)	–	–	–
ГХБ / HCB	3,08 (0,36–10,05)	0,34 (0,04–0,85)	0,56 (0,34–1,00)	1,45 (1,18–1,75)
а-ГХЦГ / а-HCH	0,09 (< ПКО–0,20)	–	–	–
б-ГХЦГ / б-HCH	0,04 (< ПКО–0,14)	–	0,01 (< ПКО–0,02)	0,01 (0,01–0,01)
g-ГХЦГ / g-HCH	0,03 (< ПКО–0,07)	–	0,01 (< ПКО–0,01)	–
Цис-нонахлор Cis-Nonachlor	0,56 (0,10–1,02)	0,06 (0,02–0,12)	–	0,30 (0,23–0,42)
Транс-нонахлор Trans-Nonachlor	1,00 (0,17–2,57)	0,11 (< ПКО–0,31)	0,05 (< ПКО–0,13)	0,55 (0,44–0,73)
Транс-хлордан Trans-Chlordane	2,03 (0,34–3,67)	0,04 (< ПКО–0,17)	–	0,08 (< ПКО– 0,18)
Цис-хлордан Cis-Chlordane	–	0,03 (< ПКО–0,09)	–	–
Мирекс / Mirex	0,02 (0,01–0,06)	0,04 (0,01–0,08)	0,01 (ПКО–0,01)	0,01 (0,01–0,03)
ΣТХБ / ΣTVX	–	0,01 (ПКО–0,04)	–	–

Примечание: ПКО – предел количественного обнаружения; «–» – нет сигнала.  
Note: ПКО – limit of quantitation, “–” – no signal.

Второй группой соединений СОЗ, обнаруживаемой в мышцах исследуемых рыб, являются продукты распада ДДТ. У сёмги была выявлена самая высокая средняя концентрация  $\Sigma$ ДДТ (3,08 нг/г сырого веса), что, тем не менее, в 100 раз ниже ПДК для пресноводных видов рыб, в 65 раз ниже для морских видов рыб и в 649 раз ниже для жирных сортов рыб. Самая низкая концентрация этого вещества установлена в азиатской корюшке. Из четырёх исследуемых метаболитов ДДТ доминирующим соединением являлся *p,p'*-ДДЕ, который является основным остатком продукта распада ДДТ, что также наблюдалось в других подобных исследованиях рыб [12, 16, 17, 23]. В сёмге, арктическом гольце, азиатской корюшке и сельди концентрация *p,p'*-ДДЕ варьирует от 0,20 до 2,19 нг/г сырого веса. Суммарное содержание ДДТ в мышечной ткани сёмги и арктического гольца НАО было в 1,5–3,0 раза ниже, чем у тех же видов, представленных в исследовании в 2013 г. в бассейне Баренцева моря [12]. В азиатской корюшке была обнаружена самая низкая средняя концентрация *p,p'*-ДДЕ (0,2 нг/г сырого веса), она в 32 раза ниже, чем у видов рыб рода *Osmerus* [23]. В сёмге и сельди уровень этого анализа был в 1,5–3,0 раза выше по сравнению с уровнем основных соединений ПХБ. Кроме того, в исследованных образцах присутствовал *p,p'*-ДДД, но уровень его в анализированных образцах был в среднем в 2,7–8,0 раз ниже по сравнению с концентрацией *p,p'*-ДДЕ. *p,p'*-ДДЕ наряду с содержанием ПХБ 153 являются основными веществами из перечня СОЗ, особенно в арктическом гольце.

Оценить давность присутствия метаболитов ДДТ в местной фауне можно с использованием соотношения ДДЕ/ДДТ в организме животных. Так, если уровень *p,p'*-ДДЕ выше по отношению к *p,p'*-ДДТ, то загрязнения имеют давний характер [12]. В сёмге, арктическом гольце, азиатской корюшке и сельди соотношение данных метаболитов высокое, ввиду отсутствия соединения изомеров ДДТ в анализируемых пробах, что свидетельствует о раннем загрязнении соединением ДДТ водных объектов, где проводился отбор проб.

Наряду с ПХБ и метаболитами ДДТ, в мышечной ткани исследуемых образцов были обнаружены другие ХОП, такие как ГХБ, изомеры ГХЦГ, хлорданы, нонахлоры и мирекс. Гексахлорбензол был обнаружен во всех исследуемых образцах рыб в диапазоне от 0,34 (арктический голец) до 3,08 нг/г сырого веса (сёмга). Концентрация ГХБ в 1,1 раз

выше, чем в азиатской корюшке из Белого моря [23]. В арктическом гольце и сёмге уровень ГХБ был в 1,7–3,8 раза ниже по сравнению с литературными данными по Кольскому полуострову [12]. Однако в предыдущих наших исследованиях по изучению наваги, сига-пыжьяна, щуки и горбуши, обитающих в НАО, уровень ГХБ колебался от 0,13 до 0,40 нг/г сырого веса [20]. Вероятно, такие обнаруженные уровни ГХБ связаны не только с антропогенным характером этого соединения, загрязнённостью исследуемых водных объектов, но и с особенностями исследуемых видов (количество образцов рыб, физиологические параметры), а также методиками определения этого соединения в образцах.

Изомеры ГХЦГ имели относительно небольшой уровень накопления в рыбах водных объектов НАО. Максимальные средние концентрации обнаружены у сёмги (0,03–0,09 нг/г сырого веса), а самые низкие – в других исследуемых видах рыб (не более 0,01 нг/г сырого веса).

Соединения, относящиеся к группе хлорданы (цис-хлордан, транс-хлордан) и нонахлор (цис-нонахлор, транс-нонахлор), присутствовали во всех исследуемых образцах, их концентрация была ниже в 3,9–16,0 раз, чем в аналогичных видах рыб Кольского полуострова [12, 23]. Максимальная разница в видовой специфичности по сумме изомеров хлорданов и нонахлоров характерна для сёмги и сельди – в среднем 3,59 нг/г сырого веса, тогда как у арктического гольца и азиатской корюшки – 0,24 и 0,05 нг/г сырого веса соответственно.

Содержание мирекса в мышцах рыб варьировало от 0,05 до 0,13 нг/г сырого веса. Согласно проведённым ранее исследованиям, уровень этого соединения за последние 18 лет в промысловых видах рыб практически не изменился [16], что может указывать на его устойчивость к биоразложению в окружающей среде и отсутствие нового источника загрязнения.

Оценку географических различий уровней СОЗ в отдельных видах рыб проводили на примере сёмги и арктического гольца, обитающих в речных и морских системах НАО. На рисунке представлена карта распределения СОЗ в образцах рыб в зависимости от места отбора проб.

Результаты исследования показали, что уровни ПХБ, метаболитов ДДТ и ГХБ в образцах двух видов рыб различались в зависимости от места обитания. Сёмга, выловленная в бассейне р. Печора, имела более высокий суммарный уровень сравниваемых соеди-

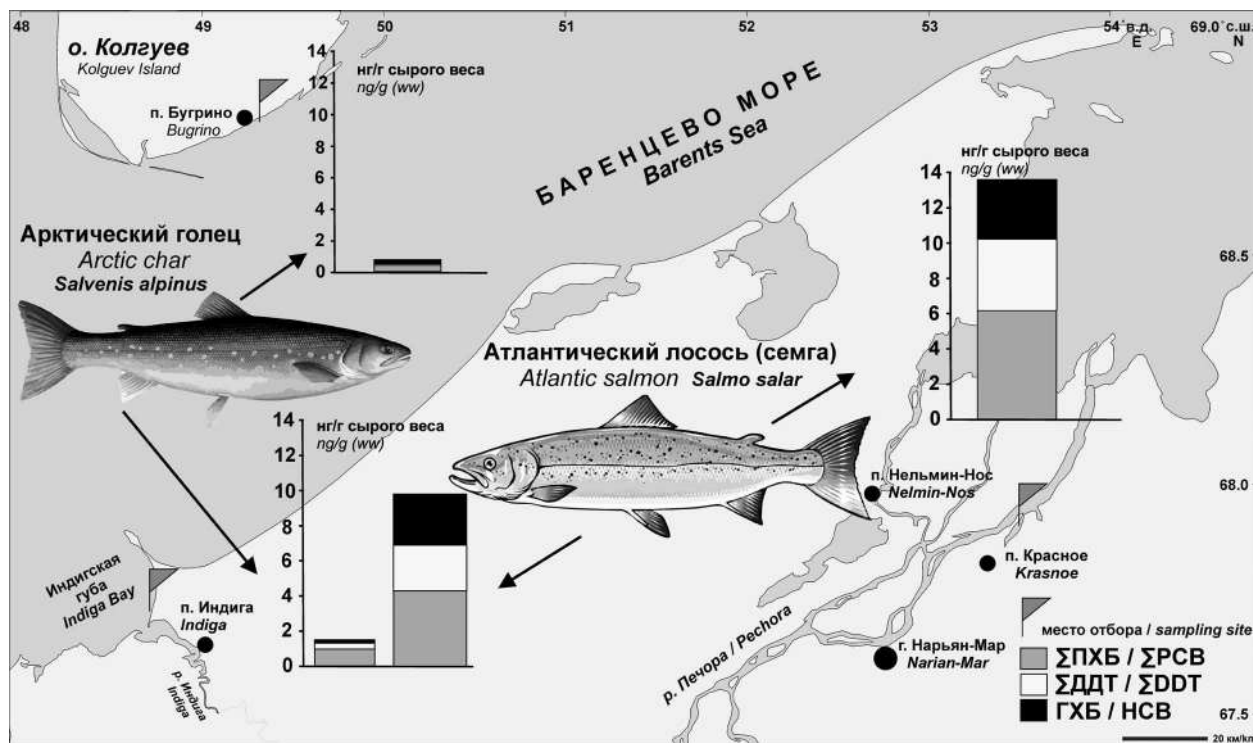


Рис. Места отбора и уровень ΣПХБ, ΣДДТ и ГХБ в промысловых видах рыб НАО  
 Fig. Sampling sites and levels of ΣPCB, ΣDDT and HCB in commercial fish species of the NAO

нений (13,17 нг/г сырого веса) в отличие от рыбы того же вида из Индигского залива Баренцева моря (10,25 нг/г сырого веса). Однако максимальные значения ΣПХБ, ΣДДТ и ГХБ были зафиксированы в образцах из Индигского залива и соответственно равны 10,05; 6,30; 10,04 нг/г сырого веса, что в 1,5–3,5 раза выше по сравнению с образцами из р. Печоры. Следует отметить, что количество образцов в выборке реки и морского залива различалось, но данная информация имеет важное значение для мониторинговых исследований, так как достоверных данных по уровню СОЗ данных водоёмов в литературе не представлено.

Вероятнее всего высокий суммарный уровень СОЗ в рыбах бассейна реки Печоры связан с возрастными особенностями и содержанием липидов, так как возраст сёмги из р. Печоры в среднем составлял 6+ и содержание липидов 12,41%, в то время как в Индигском заливе данные показатели составляли 2+ и 2,83% соответственно.

Сравнение СОЗ в образцах рыб, обитающих в море и морском заливе, показало, что арктический голец Индигского залива характеризуется высоким содержанием ПХБ и ДДТ по сравнению с образцами рыб из Баренцева моря (близ п. Бугрино). Уровень ГХБ в сравниваемых образцах в зависимости

от места обитания был практически одинаковым и равен в среднем 0,34 нг/г сырого веса. В арктическом гольце, обитающем также, как и сёмга в Индигском заливе, обнаружены максимальные уровни ΣПХБ, ΣДДТ и ГХБ относительно другого места отбора. Таким образом, подобный анализ географических уровней СОЗ в особях одного и того же вида, но в отличающихся условиях обитания, позволяет выявить наиболее опасные участки загрязнения биоты в Арктике.

Как уже было отмечено выше, проведённое исследование показало, что мышечная ткань (филе) сёмги содержит наибольшие концентрации ряда СОЗ по сравнению с другими видами рыб, традиционно потребляемыми в пищу жителями Арктики. Ранее проведённые исследования подтверждают этот факт [12]. В связи с тем, что сёмга является одним из самых популярных видов рыбы среди местного населения НАО [19], нам видится оправданным и необходимым включение данного вида в качестве основного объекта в программу систематических биомониторинговых исследований на территории НАО.

Стоит отметить, что для корректного сравнения данных по СОЗ требуется как минимум 5–7 проанализированных особей. Данная информация получена впервые, и это крайне важно для дальнейшей оценки содержания

Таблица 2 / Table 2

Коэффициенты опасности и добавочного риска возникновения рака в течение жизни при воздействии основных СОЗ, обнаруженных в мышцах четырёх исследованных видов рыб, для жителей Ненецкого автономного округа  
 Hazard coefficients and additional risk factors for the occurrence for cancer during life under the influence of the main POPs found in the muscles of the four studied fish species for residents of the Nenets Autonomous Okrug

Соединения Compound	Коэффициенты экологического риска / Ecological risk ratios			
	суточная доза для коэффициента опасности (доза для HQ) Daily dose for hazard quotients (Dose for HQ)	коэффициент опасности (HQ) hazard Quotients (HQ)	суточная доза канцерогенной нагрузки (доза для ILCR) Daily dose of carcinogenic load (Dose for ILCR)	добавочный риск рака в течение жизни (ILCR) Incremental Lifetime Cancer Risk (ILCR)
Сёмга Индига / Salmon Indiga				
ΣДДТ / ΣDDT	$4,2 \cdot 10^{-6}$	$8,4 \cdot 10^{-3}$	$4,2 \cdot 10^{-6}$	$1,1 \cdot 10^{-6}$
ΣПХБ / ΣPCB	$6,7 \cdot 10^{-6}$	$5,1 \cdot 10^{-2}$	$5,0 \cdot 10^{-6}$	$1,0 \cdot 10^{-5*}$
ГХБ / HCB	$6,7 \cdot 10^{-6}$	$8,3 \cdot 10^{-3}$	$5,0 \cdot 10^{-6}$	$8,0 \cdot 10^{-6}$
Сёмга Печора / Salmon Pechora				
ΣДДТ / ΣDDT	$1,8 \cdot 10^{-7}$	$3,6 \cdot 10^{-4}$	$1,2 \cdot 10^{-6}$	$4,1 \cdot 10^{-7}$
ΣПХБ / ΣPCB	$2,8 \cdot 10^{-7}$	$2,1 \cdot 10^{-3}$	$1,8 \cdot 10^{-6}$	$3,7 \cdot 10^{-6}$
ГХБ / HCB	$1,4 \cdot 10^{-6}$	$1,7 \cdot 10^{-3}$	$9,2 \cdot 10^{-7}$	$1,5 \cdot 10^{-6}$
Арктический голец Индига / Arctic char Indiga				
ΣДДТ / ΣDDT	$4,5 \cdot 10^{-7}$	$9,0 \cdot 10^{-4}$	$3,4 \cdot 10^{-7}$	$1,2 \cdot 10^{-7}$
ΣПХБ / ΣPCB	$1,0 \cdot 10^{-6}$	$1,0 \cdot 10^{-2}$	$7,5 \cdot 10^{-7}$	$1,5 \cdot 10^{-6}$
ГХБ / HCB	$3,5 \cdot 10^{-7}$	$4,3 \cdot 10^{-4}$	$2,6 \cdot 10^{-7}$	$4,2 \cdot 10^{-7}$
Арктический голец Бугрино / Arctic char Buginno				
ΣДДТ / ΣDDT	$3,3 \cdot 10^{-7}$	$6,6 \cdot 10^{-4}$	$1,9 \cdot 10^{-7}$	$6,6 \cdot 10^{-8}$
ΣПХБ / ΣPCB	$4,0 \cdot 10^{-7}$	$3,1 \cdot 10^{-3}$	$2,4 \cdot 10^{-7}$	$4,7 \cdot 10^{-7}$
ГХБ / HCB	$2,3 \cdot 10^{-7}$	$2,9 \cdot 10^{-4}$	$1,3 \cdot 10^{-7}$	$2,2 \cdot 10^{-7}$
Азиатская корюшка / Rainbow smelt				
ΣДДТ / ΣDDT	$5,3 \cdot 10^{-7}$	$1,1 \cdot 10^{-3}$	$3,7 \cdot 10^{-7}$	$1,3 \cdot 10^{-7}$
ΣПХБ / ΣPCB	$1,6 \cdot 10^{-6}$	$1,3 \cdot 10^{-2}$	$1,1 \cdot 10^{-6}$	$2,3 \cdot 10^{-6}$
ГХБ / HCB	$7,3 \cdot 10^{-7}$	$9,1 \cdot 10^{-4}$	$5,1 \cdot 10^{-7}$	$8,2 \cdot 10^{-7}$
Сельдь / Herring				
ΣДДТ / ΣDDT	$1,0 \cdot 10^{-6}$	$2,0 \cdot 10^{-3}$	$7,0 \cdot 10^{-7}$	$2,4 \cdot 10^{-7}$
ΣПХБ / ΣPCB	$2,3 \cdot 10^{-6}$	$1,8 \cdot 10^{-2}$	$1,6 \cdot 10^{-6}$	$3,2 \cdot 10^{-6}$
ГХБ / HCB	$8,7 \cdot 10^{-7}$	$1,1 \cdot 10^{-3}$	$6,1 \cdot 10^{-7}$	$9,8 \cdot 10^{-7}$

Примечание: \* – рассчитанный добавочный риск возникновения рака в течение жизни превышает  $1 \cdot 10^{-5}$ , что указывает на потенциальное существование риска рака.

Note: \* – the calculated incremental lifetime cancer risk is greater than  $1 \cdot 10^{-5}$  which indicates that a cancer risk potentially exists.

токсических веществ и расчёта рисков для здоровья населения Севера.

Стойкие органические загрязнители даже в концентрациях ниже ПДК за счёт процессов биоаккумуляции и биоманнификации могут накапливаться в организме человека в течение всей жизни и очень медленно выводятся, и таким образом могут наносить вред здоровью [16]. В связи с этим, текущее содержание СОЗ в исследованных промысловых видах рыб не может свидетельствовать об отсутствии рисков для здоровья человека. Поэтому важно не

только сравнивать результаты химического анализа с имеющимися нормативами, но также учитывать популярность и длительность потребления конкретных видов местным населением.

В связи с вышесказанным нами было проведено анкетирование жителей трёх населённых пунктов, вблизи которых проводили отбор проб рыбы. Результаты данной работы были нами опубликованы ранее [19]. Анализ результатов анкетирования показал, что жители п. Индига НАО ежедневно потре-

бляют 47,12 г/сут сёмги, 28,93 г/сут арктического гольца, 49,6 г/сут азиатской корюшки и 33,93 г/сут сельди. В то время как люди, проживающие в п. Красное и п. Нельмин-Нос (расположены на р. Печора), потребляют в среднем 26,64 г/сут сёмги, а в п. Бугрино – 27,25 г/сут арктического гольца. Средний возраст участников исследования, проживающих в ранее упомянутых населённых пунктах, варьировал от 41,6 до 53,8 лет, вес – от 67,3 до 71,0 кг [21, 22].

Полученные значения коэффициентов экологического риска при потреблении местных продуктов питания жителями НАО приведены в таблице 2.

Как видно из таблицы 2, потенциальный риск для здоровья людей, употребляющих сёмгу из Индигского залива Баренцева моря, обусловлен максимальным содержанием  $\Sigma$ ПХБ<sub>10</sub> – 10,05 нг/г сырого веса. По остальным видам рыб полученные значения коэффициентов опасности и дополнительного риска возникновения рака в течение жизни были ниже пороговых значений ( $HQ < 0,2$ ;  $ILCR < 1 \cdot 10^{-5}$ ). Промысловые виды рыб вылова 2018–2022 гг. из трёх водных объектов НАО в целом безопасны, что отражает снижение уровня СОЗ по сравнению с ранее доступными данными в литературе [12, 16, 23]. Исключение составляет сёмга вылова 2018 г. (риск развития рака от  $\Sigma$ ПХБ<sub>10</sub>).

Стоит отметить, что для расчётов использовали среднее суточное потребление рыбы жителями, проживающими в соответствующих населённых пунктах НАО. Вероятно, реального риска развития онкологии именно от СОЗ, содержащихся в сёмге, сельди, азиатской корюшке и арктическом гольце, нет. Однако полученные результаты указывают, что потенциальный риск возникновения онкологических заболеваний при потреблении промысловых видов рыб в данном регионе возможен. Это указывает на несовершенство текущих нормативных актов по безопасности рыбной продукции. Поэтому на основании актуальных уровней содержания СОЗ для рыбной продукции в научной литературе необходимо провести дополнительные исследования с целью обновления санитарно-гигиенических нормативов в области контроля безопасности пищевой продукции в отношении СОЗ с учётом кумулятивных рисков для здоровья человека.

Таким образом, из 28 исследованных соединений СОЗ в промысловых видах рыб НАО (сёмга, сельдь, арктический голец, азиатская корюшка) основными являются ПХБ 153, 138,

128, 118, p,p'-ДДЕ, ГХБ и соединения хлордана. Сёмгу и сельдь следует считать наиболее контаминированными видами рыб по всему перечню исследованных СОЗ. Наибольший уровень ПХБ 153, 138, 118, p,p'-ДДЕ и ГХБ обнаружен в сёмге и составил 1,08; 1,03; 0,72; 2,19; 3,08 и 3,59 нг/г сырого веса, что выше в 1,2–3,9 раза, чем в сельди. В остальных видах рыб присутствовали невысокие уровни концентраций других СОЗ, что связано с физиологическими и биохимическими параметрами (содержание жира, возраст и вес), а не только с условиями обитания этих организмов.

### Заключение

Получены новые данные для мониторинговых исследований ПХБ и ХОП в промысловых видах рыб Арктического региона на примере трёх водоёмов НАО, расположенных близ п. Индига, п. Бугрино, п. Нельмин-Нос и п. Красное, где местные жители ведут традиционный образ жизни.

Доминирующими загрязнителями из перечня соединений Стокгольмской конвенции о СОЗ в мышцах исследуемых рыб являются p,p'-ДДЕ, ПХБ 153, 138, 128, 118 и ГХБ, содержание которых находится в пределах 0,04–3,08 нг/г сырого веса, что свидетельствует о давности поступления этих контаминантов в окружающую среду.

Установлено, что полученные уровни содержания  $\Sigma$ ДДТ,  $\Sigma$ ПХБ<sub>10</sub>,  $\Sigma$ ГХЦГ в мышечной ткани рыб не превышают установленных ПДК. Средняя суммарная концентрация СОЗ у сёмги, сельди, арктического гольца, азиатской корюшки, находится в интервале 2,02–15,01 нг/г сырого веса.

Однако при суточном потреблении сёмги, обитающей в Индигском заливе Баренцева моря, как традиционного продукта питания более 45 г/сут, обнаружен потенциальный риск возникновения рака, связанный с поступлением ПХБ в организм человека. Полученные результаты составляют фундаментальные основы для развития концепции биомониторинга в Арктике и корректировки рациона питания жителей Севера с учётом содержания не только полезных и незаменимых нутриентов, но и токсичных соединений, которые могут нести потенциальный риск здоровью человека.

*Настоящая работа была выполнена при финансовой поддержке Российского на-*

учного фонда (договор от 22.03.2022 № 22-15-20076).

### Литература

1. Hjermitsev M., Long M., Wielsøe M., Bonefeld-Jørgensen E. Persistent organic pollutants in Greenlandic pregnant women and indices of foetal growth: The ACCEPT study // *Science of the Total Environment*. 2019. V. 698. Article No. 134118.
2. Long M., Knudsen A., Pedersen H., Bonefeld-Jørgensen E. Food intake and serum persistent organic pollutants in the Greenlandic pregnant women: The ACCEPT sub-study // *Science of the Total Environment*. 2015. V. 529. P. 198–212.
3. AMAP, 1998. AMAP Assessment Report: Arctic Pollution Issues. Chapter 3: The Influence of Physical and Chemical Processes on Contaminant Transport. Oslo: AMAP, 1998. 859 p.
4. De Wit C.A., Herzke D., Vorkamp K. Brominated flame retardants in the Arctic environment – Trends and new candidates // *Science of the Total Environment*. 2010. V. 408. P. 2885–2918.
5. Braune B.M., Outridge P.M., Fisk A.T., Muir D.C.G., Helm P.A., Hobbs K., Hoekstra P.F., Kuzyk Z.A., Kwan M., Letcher R.J., Lockhart W.L., Norstrom R.J., Stern G.A., Stirling I. Persistent organic pollutants and mercury in marine biota of the Canadian Arctic: An overview of spatial and temporal trends // *Science of the Total Environment*. 2005. V. 351–352. P. 4–56.
6. Hung H., Katsoyiannis A.A., Brorström-Lundén E., Olafsdottir K., Aas W., Breivik K., Bohlin-Nizzetto P., Sigurdsson A., Nakola H., Bossi R., Skov H., Sverko E., Barresi E., Fellin Ph., Wilson S. Temporal trends of Persistent Organic Pollutants (POPs) in arctic air: 20 years of monitoring under the Arctic Monitoring and Assessment Programme (AMAP) // *Environmental Pollution*. 2016. V. 217. P. 52–61.
7. Цыганков В.Ю. «Грязная дюжина» Стокгольмской конвенции. Химия и токсикология стойких органических загрязняющих веществ (СОЗ): обзор литературы // *Стойкие органические загрязняющие вещества (СОЗ) в Дальневосточном регионе: моря, организмы, человек / Под ред. В.Ю. Цыганкова. Владивосток: Изд-во Дальневосточного федерального университета, 2020. С. 12–61.*
8. Галиулин Р.В., Галиулина Р.А. Стойкие хлороорганические пестициды в системе почва-поверхностная вода: концептуальный подход // *Теоретическая и прикладная экология*. 2008. № 1. С. 51–56.
9. Stockholm Convention on Persistent Organic Pollutants Was Adopted on 22 May 2001 in Stockholm, Sweden [Электронный ресурс] <http://chm.pops.int/TheConvention/ThePOPs/TheNewPOPs> (Дата обращения: 23.07.2022).
10. Zapevalov M.A., Samsonov D.P., Kochetkov A.I., Pasyukova E.M., Bogacheva E.G. Global atmospheric transport of persistent organic pollutants to the Russian Arctic // *Russian Meteorology and Hydrology*. 2020. V. 45. P. 658–668.
11. Wania F., MacKay D. Peer reviewed: tracking the distribution of persistent organic pollutants // *Environmental Science & Technology*. 1996. V. 30. P. 390A–396A.
12. Дударев А.А., Душкина Е.В., Сладкова Ю.Н., Бурова Д.В., Гущин И.В., Талыкова Л.В., Никанов А.Н., Лукичева Л.А. Уровни экспозиции к стойким органическим загрязнителям (СОЗ) населения Печенгского района Мурманской области // *Токсикологический вестник*. 2016. № 3 (138). С. 2–9.
13. Bravo N., Grimalt J.O., Chashchin M., Chashchin V., Odland J.Ø. Drivers of maternal accumulation of organohalogen pollutants in Arctic areas (Chukotka, Russia) and 4,4'-DDT effects on the newborns // *Environment International*. 2019. V. 124. P. 541–552.
14. Walker T.R., Habeck J.O., Karjalainen T.P., Virtanen T., Solovieva N., Jones V., Kuhry P., Ponomarev V.I., Mikkola K., Nikula A., Patova E., Crittenden P.D., Young S.D., Ingold T. Perceived and measured levels of environmental pollution: interdisciplinary research in the subarctic lowlands of northeast European Russia // *AMBIO: A Journal of the Human Environment*. 2006. V. 35. No. 5. P. 220–228.
15. Государственный баланс запасов полезных ископаемых РФ на 1 января 2020 г.: ФГБУ «Росгеолфонд», Сборник сводных материалов о запасах общераспространённых полезных ископаемых РФ на 1 января 2020 г. [Электронный ресурс] <https://www.rfgf.ru/info-resursy/gosudarstvennyj-balans> (Дата обращения: 17.01.2022).
16. AMAP, 2004. Persistent Toxic Substances, Food Security and Indigenous Peoples of the Russian North. Final Report. Arctic Monitoring and Assessment Programme. Oslo: AMAP, 2004. 192 p.
17. Lukin A., Sharova J., Belicheva L., Camus L. Assessment of fish health status in the Pechora River: Effects of contamination // *Ecotoxicology and Environmental Safety*. 2011. V. 74. No. 3. P. 355–365.
18. Sobolev N., Aksenov A., Sorokina T., Chashchin V., Ellingsen D., Nieboer E., Varakina Yu., Veselkina E., Kotsur D., Thomassen Y. Essential and non-essential trace elements in fish consumed by indigenous peoples of the European Russian Arctic // *Environmental Pollution*. 2019. V. 253. P. 966–973.
19. Sobolev N., Nieboer E., Aksenov A., Sorokina T., Chashchin V., Ellingsen D., Varakina Yu., Plakhina E., Kotsur D., Kosheleva A., Thomassen Y., Sobolev N. Concentration dataset for 4 essential and 5 non-essential elements in fish collected in Arctic and sub-Arctic territories of the Nenets Autonomous and Arkhangelsk Regions of Russia // *Data in Brief*. 2019. V. 27. Article No. 104631.
20. Lakhmanov D., Varakina Y., Aksenov A., Sorokina T., Sobolev N., Kotsur D., Plakhina E., Chashchin V., Thomassen Y. Persistent Organic Pollutants (POPs) in fish consumed by the indigenous peoples from Nenets Autonomous Okrug // *Environments*. 2020. V. 7. No. 1. Article No. 3.



21. Varakina Y., Lahmanov D., Aksenov A., Trofimova A., Korobitsyna R., Belova N., Sobolev N., Kotsur D., Sorokina T., Grjibovski A.M., Chashchin V., Thomassen Y. Concentrations of persistent organic pollutants in Women's Serum in the European Arctic Russia // *Toxics*. 2021. V. 9. Article No. 6.

22. Varakina Y., Aksenov A., Lahmanov D., Trofimova A., Korobitsyna R., Belova N., Kotsur D., Sorokina T., Grjibovski A.M., Popova L., Chashchin V., Odland J.Ø., Thomassen Y. Geographic and ethnic variations in serum concentrations of legacy persistent organic pollutants among men in the Nenets Autonomous Okrug, Arctic Russia // *International Journal of Environmental Research and Public Health*. 2022. V. 19. No. 3. Article No. 1379.

23. Muir D., Savinova T., Savinov V., Alexeeva L., Potelov V., Svetochev V. Bioaccumulation of PCBs and chlorinated pesticides in seals, fishes and invertebrates from the White Sea, Russia // *Science of the Total Environment*. 2003. V. 306. P. 111–131.

24. Slope Factors (SF) for Carcinogens [Электронный ресурс] [http://www.popstoolkit.com/tools/HHRA/SF\\_USEPA.aspx](http://www.popstoolkit.com/tools/HHRA/SF_USEPA.aspx) (Дата обращения: 28.02.2022).

25. Non-Carcinogen Tolerable Daily Intake (TDI) [Электронный ресурс] <http://www.popstoolkit.com/tools/HHRA/TDI> (Дата обращения: 28.02.2022).

26. Bonito L.T., Hamdoun A., Sandin S.A. Evaluation of the global impacts of mitigation on persistent, bioaccumulative and toxic pollutants in marine fish // *Peer Journals*. 2016. V. 4. Article No.1573.

27. Жаковская З.А., Петрова В.Н., Хорошко Л.О., Кухарева Г.И., Лукин А.А. Полихлорированные бифенилы и углеводороды в донных отложениях рек бассейна р. Печоры // *Водные ресурсы*. 2010. Т. 37. № 1. С. 75–83.

28. Кириченко В.Е., Первова М.Г., Промышленникова Е.П., Пашкевич К.И. Идентификация изомерных полихлорированных бифенилов в техническом продукте «Совол» // *Аналитика и контроль*. 2000. Т. 4. № 1. С. 41–44.

## References

1. Hjermitsev M., Long M., Wielsøe M., Bonefeld-Jørgensen E. Persistent organic pollutants in Greenlandic pregnant women and indices of foetal growth: The ACCEPT study // *Science of the Total Environment*. 2019. V. 698. Article No. 134118. doi: 10.1016/j.scitotenv.2019.134118

2. Long M., Knudsen A., Pedersen H., Bonefeld-Jørgensen E. Food intake and serum persistent organic pollutants in the Greenlandic pregnant women: The ACCEPT sub-study // *Science of the Total Environment*. 2015. V. 529. P. 198–212. doi: 10.1016/j.scitotenv.2015.05.022

3. AMAP, 1998. AMAP Assessment Report: Arctic Pollution Issues. Chapter 3: The Influence of Physical and Chemical Processes on Contaminant Transport. Oslo: AMAP, 1998. 859 p.

4. De Wit C.A., Herzke D., Vorkamp K. Brominated flame retardants in the Arctic environment – Trends and new candidates // *Science of the Total Environment*. 2010. V. 408. P. 2885–2918. doi: 10.1016/j.scitotenv.2009.08.037

5. Braune B.M., Outridge P.M., Fisk A.T., Muir D.C.G., Helm P.A., Hobbs K., Hoekstra P.F., Kuzyk Z.A., Kwan M., Letcher R.J., Lockhart W.L., Norstrom R.J., Stern G.A., Stirling I. Persistent organic pollutants and mercury in marine biota of the Canadian Arctic: An overview of spatial and temporal trends // *Science of the Total Environment*. 2005. V. 351–352. P. 4–56.

6. Hung H., Katsoyiannis A.A., Brorström-Lundén E., Olafsdottir K., Aas W., Breivik K., Bohlin-Nizzetto P., Sigurdsson A., Hakola H., Bossi R., Skov H., Sverko E., Barresi E., Fellin Ph., Wilson S. Temporal trends of Persistent Organic Pollutants (POPs) in arctic air: 20 years of monitoring under the Arctic Monitoring and Assessment Programme (AMAP) // *Environmental Pollution*. 2016. V. 217. P. 52–61. doi: 10.1016/j.envpol.2016.01.079

7. Tsygankov V.Yu. “The Dirty Dozen” of the Stockholm Convention. Chemistry and toxicology of persistent organic pollutants (POPs): A review // *Persistent organic pollutants (POPs) in the Far Eastern Region: Seas, organisms, human* / Ed. V.Yu. Tsygankov. Vladivostok: Publishing House of the Far Eastern Federal University, 2020. P. 12–61 (in Russian).

8. Galiulin R.V., Galiulina R.A. Persistent organochlorine pesticides in the soil-surface water system: a conceptual approach // *Theoretical and Applied Ecology*. 2008. No. 1. P. 51–56 (in Russian). doi: 10.25750/1995-4301-2008-1-051-56

9. Stockholm Convention on Persistent Organic Pollutants Was Adopted on 22 May 2001 in Stockholm, Sweden [Internet resource] <http://chm.pops.int/TheConvention/ThePOPs/TheNewPOPs> (Accessed: 23.07.2022).

10. Zapevalov M.A., Samsonov D.P., Kochetkov A.I., Pasynkova E.M., Bogacheva E.G. Global atmospheric transport of persistent organic pollutants to the Russian Arctic // *Russian Meteorology and Hydrology*. 2020. V. 45. P. 658–668. doi: 10.3103/S1068373920090071

11. Wania F., MacKay D. Peer reviewed: tracking the distribution of persistent organic pollutants // *Environmental Science & Technology*. 1996. V. 30. P. 390A–396A. doi: 10.1021/es962399q

12. Dudarev A.A., Dushkina E.V., Sladkova Yu.N., Burova D.V., Gushchin I.V., Talykova L.V., Nikanov A.N., Lukicheva L.A. Exposure levels to persistent organic pollutants (POPs) of the population of the Pechenga district of the Murmansk Region // *Toxicological Bulletin*. 2016. V. 3 (138). P. 2–9 (in Russian). doi: 10.36946/0869-7922-2016-3-2-9

13. Bravo N., Grimalt J.O., M., Chashchin V., Odland J.Ø. Drivers of maternal accumulation of organohalogen pollutants in Arctic areas (Chukotka, Russia) and 4,4'-DDT effects on the newborns // *Environment*

- International. 2019. V. 124. P. 541–552. doi: 10.1016/j.envint.2019.01.049
14. Walker T.R., Habeck J.O., Karjalainen T.P., Virtanen T., Solovieva N., Jones V., Kuhry P., Ponomarev V.I., Mikkola K., Nikula A., Patova E., Crittenden P.D., Young S.D., Ingold T. Perceived and measured levels of environmental pollution: interdisciplinary research in the subarctic lowlands of northeast European Russia // *AMBIO: A Journal of the Human Environment*. 2006. V. 35. No. 5. P. 220–228. doi: 10.1579/06-a-127r.1
15. State Balance of Mineral Reserves of the Russian Federation as of January 1, 2020: Federal State Budgetary Institution “Rosgeolfond”, Collection of summary materials on the reserves of common minerals of the Russian Federation as of January 1, 2020 [Internet resource] <https://www.rfgf.ru/info-resursy/gosudarstvennyj-balans> (Accessed: 17.01.2022) (in Russian).
16. AMAP, 2004. Persistent Toxic Substances, Food Security and Indigenous Peoples of the Russian North. Final Report. Arctic Monitoring and Assessment Programme. Oslo: AMAP, 2004. 192 p.
17. Lukin A., Sharova J., Belicheva L., Camus L. Assessment of fish health status in the Pechora River: Effects of contamination // *Ecotoxicology and Environmental Safety*. 2011. V. 74. No. 3. P. 355–365. doi: 10.1016/j.ecoenv.2010.10.022
18. Sobolev N., Aksenov A., Sorokina T., Chashchin V., Ellingsen D., Nieboer E., Varakina Yu., Veselkina E., Kotsur D., Thomassen Y. Essential and non-essential trace elements in fish consumed by indigenous peoples of the European Russian Arctic // *Environmental Pollution*. 2019. V. 253. P. 966–973. doi: 10.1016/j.envpol.2019.07.072
19. Sobolev N., Nieboer E., Aksenov A., Sorokina T., Chashchin V., Ellingsen D., Varakina Yu., Plakhina E., Kotsur D., Kosheleva A., Thomassen Y., Sobolev N. Concentration dataset for 4 essential and 5 non-essential elements in fish collected in Arctic and sub-Arctic territories of the Nenets Autonomous and Arkhangelsk Regions of Russia // *Data in Brief*. 2019. V. 27. Article No. 104631. doi: 10.1016/j.dib.2019.104631
20. Lakhmanov D., Varakina Y., Aksenov A., Sorokina T., Sobolev N., Kotsur D., Plakhina E., Chashchin V., Thomassen Y. Persistent Organic Pollutants (POPs) in fish consumed by the indigenous peoples from Nenets Autonomous Okrug // *Environments*. 2020. V. 7. No. 1. Article No. 3. doi: 10.3390/environments7010003
21. Varakina Y., Lahmanov D., Aksenov A., Trofimova A., Korobitsyna R., Belova N., Sobolev N., Kotsur D., Sorokina T., Grjibovski A.M., Chashchin V., Thomassen Y. Concentrations of persistent organic pollutants in Women’s Serum in the European Arctic Russia // *Toxics*. 2021. V. 9. Article No. 6. doi: 10.3390/toxics9010006
22. Varakina Y., Aksenov A., Lahmanov D., Trofimova A., Korobitsyna R., Belova N., Kotsur D., Sorokina T., Grjibovski A.M., Popova L., Chashchin V., Odland J.Ø., Thomassen Y. Geographic and ethnic variations in serum concentrations of legacy persistent organic pollutants among men in the Nenets Autonomous Okrug, Arctic Russia // *International Journal of Environmental Research and Public Health*. 2022. V. 19. Article No. 1379. doi: 10.3390/ijerph19031379
23. Muir D., Savinova T., Savinov V., Alexeeva L., Potelov V., Svetochev V. Bioaccumulation of PCBs and chlorinated pesticides in seals, fishes and invertebrates from the White Sea, Russia // *Science of the Total Environment*. 2003. V. 306. P. 111–131.
24. Slope Factors (SF) for Carcinogens [Internet resource] [http://www.popstoolkit.com/tools/HHRA/SF\\_USEPA.aspx](http://www.popstoolkit.com/tools/HHRA/SF_USEPA.aspx) (Accessed: 28.02.2022).
25. Non-Carcinogen Tolerable Daily Intake (TDI) [Internet resource] <http://www.popstoolkit.com/tools/HHRA/TDI> (Accessed: 28.02.2022).
26. Bonito L.T., Hamdoun A., Sandin S.A. Evaluation of the global impacts of mitigation on persistent, bioaccumulative and toxic pollutants in marine fish // *Peer Journals*. 2016. V. 4. Article No. 1573. doi: 10.7717/peerj.1573
27. Zhakovskaya Z.A., Petrova V.N., Khoroshko L.O., Kukhareva G.I., Lukin A.A. Polychlorinated biphenyls and hydrocarbons in bottom sediments of rivers in the Pechory // *Water resources*. 2010. V. 37. No. 1. P. 75–83 (in Russian).
28. Kirichenko V.E., Pervova M.G., Promyshlennikova E.P., Pashkevich K.I. Identification of isomeric polychlorinated biphenyls in the technical product “Sovol” // *Analytics and control*. 2000. V. 4. No. 1. P. 41–44 (in Russian).

## Зообентос русла реки Северная Двина

© 2023. М. А. Студёнова, специалист,  
И. И. Студёнов, к. б. н., зам. руководителя филиала,  
Д. В. Чупов, специалист,  
Северный филиал ФГБНУ «ВНИРО»,  
163002, Россия, г. Архангельск, ул. Урицкого, д. 17,  
e-mail: Studenov@severniro.ru, Studenova@severniro.ru

Комплексные исследования зообентоса р. Северная Двина начаты в 1995 г. Северным филиалом ФГБНУ «ВНИРО». За этот период в составе зообентоса было обнаружено 20 таксонов, относящихся к 6 типам и 8 классам беспозвоночных. Численность беспозвоночных за годы наблюдений варьировала от 50 экз./м<sup>2</sup> до 10840 экз./м<sup>2</sup>, составив в среднем 3052 экз./м<sup>2</sup>. Основу численности формировали малощетинковые черви и личинки комаров-звонцов. Биомасса беспозвоночных в русле р. Северная Двина за годы наблюдений варьировала от 0,01 г/м<sup>2</sup> до 19,10 г/м<sup>2</sup>, составив в среднем по всем станциям за все годы наблюдений 2,35 г/м<sup>2</sup>. Основу биомассы формировали личинки комаров-звонцов, их доля в формировании общей биомассы достигала 96%. Очевидно, что межгодовые изменения численности и биомассы зообентоса и изменения этих параметров по протяжённости реки преимущественно связаны с гидрологическими особенностями каждого конкретного года наблюдений на р. Северная Двина и её наиболее крупных притоках, чем с влиянием хозяйственной деятельности. Выяснение связи гидрологических параметров, и, прежде всего, водности реки, требует проведения дополнительных исследований.

**Ключевые слова:** Северная Двина, зообентос, численность, биомасса.

## Zoobentos of the Severnaya Dvina River

© 2023. М. А. Studenova <sup>ORCID: 0000-0001-5778-190X</sup>  
I. I. Studenov <sup>ORCID: 0000-0002-0826-2537</sup>  
D. V. Chupov <sup>ORCID: 0000-0001-6196-5744</sup>  
Northern Branch of “VNIRO”,  
17, Uritskogo St., Arkhangelsk, Russia, 163002,  
e-mail: Studenov@severniro.ru, Studenova@severniro.ru

The Northern Branch of All-Russian Research Institute of Fisheries and Oceanography (FSBNU VNIRO) began comprehensive research on zoobenthos in the mainstream of the Severnaya Dvina River in 1995. Systematic studies of zoobenthos at the Severnaya Dvina River for the first time made it possible to obtain the most complete information about the taxonomic composition of the invertebrates, the number and frequency of taxons across different sections of the mainstream, the number and biomass of each taxon. As part of the zoobenthos for the entire study period (1995–2019), 20 taxons belonging to 6 types and 8 invertebrates classes were discovered. The average number of invertebrates taxons found in samples for the entire study period was 9 in the upper and middle parts of the mainstream of the Severnaya Dvina River, 8 in the lower parts, varying in significant ranges from 2 to 15 in different years. Every year at all stations in the samples there were oligochaetes and larvae of chironomids (or lake flies), which dominated in frequency. The lowest frequency of occurrence (5.3% each) was found in the upper part of the mainstream of the Severnaya Dvina river for the larvae of stoneflies and springtail, in the middle parts – 5.6% for gastropods, leeches, water bugs, beetle larvae and turbellarians. In the lower part of the mainstream of the Severnaya Dvina water spiders, water bugs and beetle larvae were rarely found in samples (5.3% each). The number of invertebrates in the mainstream of the Severnaya Dvina River varied within very wide limits, averaging 3052 units/m<sup>2</sup> for the entire observation period. The average biomass of invertebrates in the mainstream of the Severnaya Dvina river amounted to 2.35 g/m<sup>2</sup>. The biomass base was also formed by oligochaetes and larvae of chironomids. Obviously, interannual changes in the number and biomass of zoobenthos and changes in these parameters along the length of the river are more associated with the hydrological features of each year of observations in the Severnaya Dvina River and its largest tributaries than with the influence of human activity. Clarification of the relationship of hydrological parameters, and above all – the water content of the river year to year requires additional research.

**Keywords:** the Severnaya Dvina River, zoobenthos, abundance, biomass.

Первые сведения о донных беспозвоночных р. Северная Двина, в частности – моллюсках дельты реки, представлены в 1927 г. [1]. Затем до 1960-х гг. исследования донной фауны реки не проводили. Основной задачей изучения состава донных биоценозов в 1960–1980-х гг. являлась оценка влияния деятельности промышленных предприятий, прежде всего, целлюлозно-бумажных комбинатов (ЦБК), на экосистему нижнего течения и дельты р. Северная Двина [2–4]. Кроме того, на этих же участках реки проводили поиск индикаторных видов зообентоса [5, 6], исследовали отдельные таксоны, включая инвазийные [7–10]. Таким образом, все предшествующие исследования бентофауны р. Северная Двина выполнены в нижнем течении реки (до 22 км от устья) и в дельте реки [11]. В верхнем и среднем течении реки, а также на большей части её нижнего течения ранее исследований не проводилось, сведения о зообентосе этих участков р. Северная Двина представлены впервые.

Систематические исследования зообентоса русла р. Северная Двина были начаты в 1995 г. Северным филиалом ФГБНУ «ВНИРО» в рамках выполнения государственного мониторинга водных биоресурсов и среды их обитания. Цель работы – получение сведений о таксономическом составе зообентоса, количестве и частоте встречаемости таксонов, численности и биомассе каждого из таксонов. Актуальность работы заключается в представлении обобщённых результатов первых комплексных исследований, дающих наиболее полное представление о составе зообентоса русла р. Северная Двина, его численности и биомассе, а также о распределении этих показателей в верхнем, среднем и нижнем течении реки в 1995–2019 гг.

### Объекты и методы исследований

Река Северная Двина образуется от слияния рек Сухона и Юг, впадает в Двинскую губу Белого моря. Общая протяжённость Северной Двины – 744 км [12]. Площадь водосбора – 357000 км<sup>2</sup>, речная сеть развита очень сильно – в её состав входит 61878 рек и ручьёв, средняя густота речной сети по бассейну составляет 0,58 км/км<sup>2</sup> [13]. Наиболее крупные притоки р. Северная Двина – р. Вычегда (протяжённость 1130 км, впадает на 673 км от устья), р. Вага (протяжённость 575 км, впадает на 362 км от устья), р. Пинега (протяжённость 779 км, впадает на 137 км от устья). Русло р. Северная Двина неустойчиво к размыву,

русловые деформации отмечаются после каждого весеннего половодья [13].

Гидробиологические материалы собраны в ходе научно-исследовательских рейсов, выполнявшихся из г. Архангельск вверх по течению р. Северная Двина. Работы ежегодно проводили в одни и те же сроки – в конце августа – начале сентября. В связи с неустойчивостью русла реки количество гидробиологических станций, на которых отбирали пробы, изменялось от года к году. Кроме того, на возможность сбора проб в верховьях р. Северная Двина значительное влияние оказывали уровни воды в разные годы: в годы с низкими уровнями воды сбор материалов на участке выше впадения р. Вага был затруднён в связи со сложной судоходной обстановкой.

Сбор бентосных проб на каждой станции выполняли в 3-кратной повторности – у левого берега, у правого берега и на участке с наибольшей глубиной, расположенной на линии, проходящей через пункты отбора проб у берегов. Пробы отбирали дночерпателем Петерсена с площадью захвата 0,025 м<sup>2</sup> с песчаных грунтов различного фракционного состава и плотности. Глубины отбора проб у берегов составляли 1,5–2,5 м, в пунктах с наибольшей глубиной – от 2 до 18 м. Первичную промывку осуществляли в сачках из газ-сита № 23 [14]. После первичной промывки пробы фиксировали 4% раствором формалина, этикетировали и затем обрабатывали в камеральных условиях согласно общепринятым методам. Определяли систематическую принадлежность организмов зообентоса с помощью общепринятых определителей [15]. Всего за период исследований работы проведены на 22 гидробиологических станциях (рис. 1), собрано и обработано 459 проб зообентоса.

Для редукции количества данных, удобства описания и дальнейшего анализа материалов, полученных по разному количеству ежегодно исследуемых станций, русло р. Северная Двина было разделено на 3 участка между впадениями главных притоков: верхнее течение (от устья р. Вычегда до устья р. Вага), среднее течение (от устья р. Вага до устья р. Пинега) и нижнее течение или устьевая область (от устья р. Пинега до вершины дельты р. Северная Двина).

При подготовке статьи использована база данных «Зообентос пресноводных водных объектов Севера России» [16].

### Результаты и обсуждение

В составе зообентоса за весь период исследований (1995–2019 гг.) было обнару-

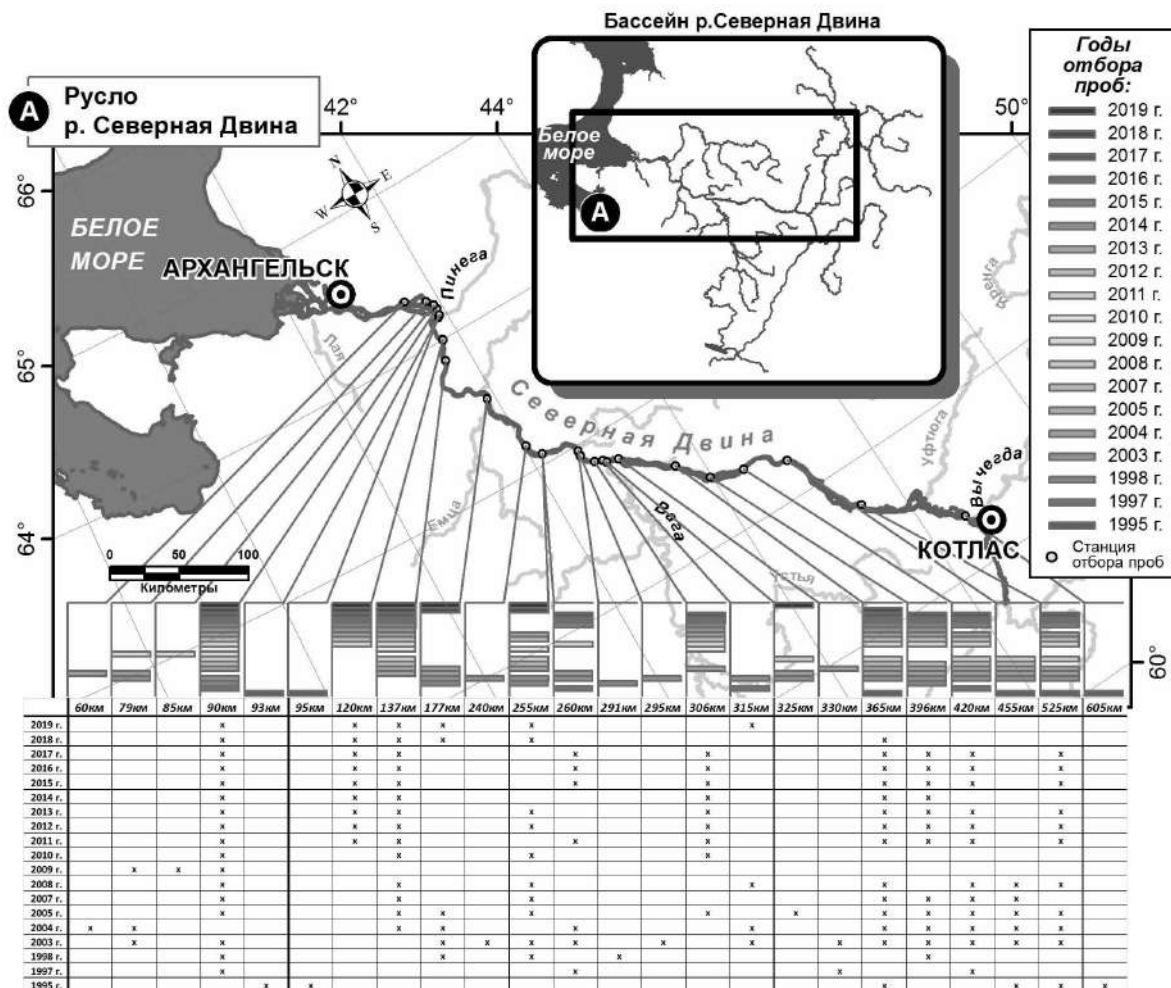


Рис. 1. Схема расположения станций отбора проб зообентоса в русле р. Северная Двина в 1995–2019 гг.  
 Fig. 1. Layout of zoobenthos sampling stations in the mainstream of Severnaya Dvina River in 1995–2019

жено 20 таксонов: Acari (водяные клещи); Aranei (пауки); Ostracoda (ракошковые ракообразные); Collembola (ногохвостки); Plecoptera (веснянки); Ephemeroptera (подёнки); Coleoptera (жуки); Trichoptera (ручейники); Heteroptera (клопы); Diptera (двукрылые); Ceratorogonidae (мокрецы); Chironomidae (звонцы); Simuliidae (мошки); Hirudinea (пиявки); Oligochaeta (малощетинковые черви); Nematoda (круглые черви); Gastropoda (брюхоногие моллюски); Bivalvia (двустворчатые моллюски); Hydra (гидра); Turbellaria (ресничные черви).

Среднее количество встречаемых в пробах таксонов беспозвоночных за весь период исследований составило в верхнем и среднем течении 9, в нижнем течении – 8, варьируя в значительных пределах – от 2 до 15 в разные годы.

Ежегодно на всех станциях в верхнем и среднем течении реки в пробах встречались малощетинковые черви (Oligochaeta) и личинки комаров-звонцов (Chironomidae), частота встречаемости указанных таксонов составила 100%. В нижнем течении реки малощетинковые черви и личинки комаров-звонцов встречались в пробах практически ежегодно, за исключением 1998 г., при этом их частота встречаемости составила 94,7%. Более чем в 50% проб в верхнем течении встречались 7 таксонов из 19 отмеченных за весь период наблюдений (куколки комаров-звонцов, личинки мокрецов, подёнок, ручейников и неопределённых двукрылых, круглые черви и двустворчатые моллюски). В среднем течении более чем в половине проб были отмечены 5 таксонов из 20, отмеченных за все годы сбора материалов (круглые черви, ку-

колки комаров-звонцов, личинки мокрецов и подёнок и водяные клещи). В нижнем течении только 4 таксона из 20, зарегистрированных за всё время наблюдений, были встречены более чем в 50% проб – круглые черви, двустворчатые и брюхоногие моллюски и личинки мокрецов. Наиболее редко (менее, чем в 10% проб) в верхнем течении встречались 2 таксона – личинки веснянок и ногохвостки (по 6,3% соответственно). В среднем течении менее чем в 10% проб были встречены 6 таксонов: брюхоногие моллюски, пиявки, водяные клопы, личинки жуков, куколки мокрецов и мошек – по 5,6% соответственно. В нижнем течении менее, чем в 10% проб, были встречены 5 таксонов: водяные пауки, водяные клопы, личинки жуков, куколки мокрецов и ресничные черви – по 5,3% соответственно.

Численность беспозвоночных в русле р. Северная Двина за годы наблюдений варьировала в очень широких пределах. Наибольший диапазон изменений численности был отмечен в нижнем течении, где минимальная

для всего русла реки численность в 50 экз./м<sup>2</sup> была зарегистрирована в 1998 г., а максимальная – 10840 экз./м<sup>2</sup> в 2007 г. (рис. 2). Средняя численность организмов зообентоса на этом участке за все годы наблюдений составила 3053 экз./м<sup>2</sup>. В среднем течении численность беспозвоночных варьировала в меньшем диапазоне – от 560 экз./м<sup>2</sup> (2017 г.) до 8620 экз./м<sup>2</sup> (2011 г.), составив в среднем 3508 экз./м<sup>2</sup>. В верхнем течении р. Северная Двина численность беспозвоночных варьировала меньше, чем на нижнем и среднем участках реки – от 207 экз./м<sup>2</sup> (2008 г.) до 5493 экз./м<sup>2</sup> (2005 г.). Среднее значение численности на верхнем участке реки было ниже, чем в низовьях и среднем течении и составило за весь период наблюдений 2445 экз./м<sup>2</sup>.

Основу численности на всех участках русла р. Северная Двина за все годы исследований формировали малоцетинковые черви и личинки комаров-звонцов. В среднем на их доли за все годы наблюдений пришлось в верхнем течении 20,0 и 70,4%, в среднем

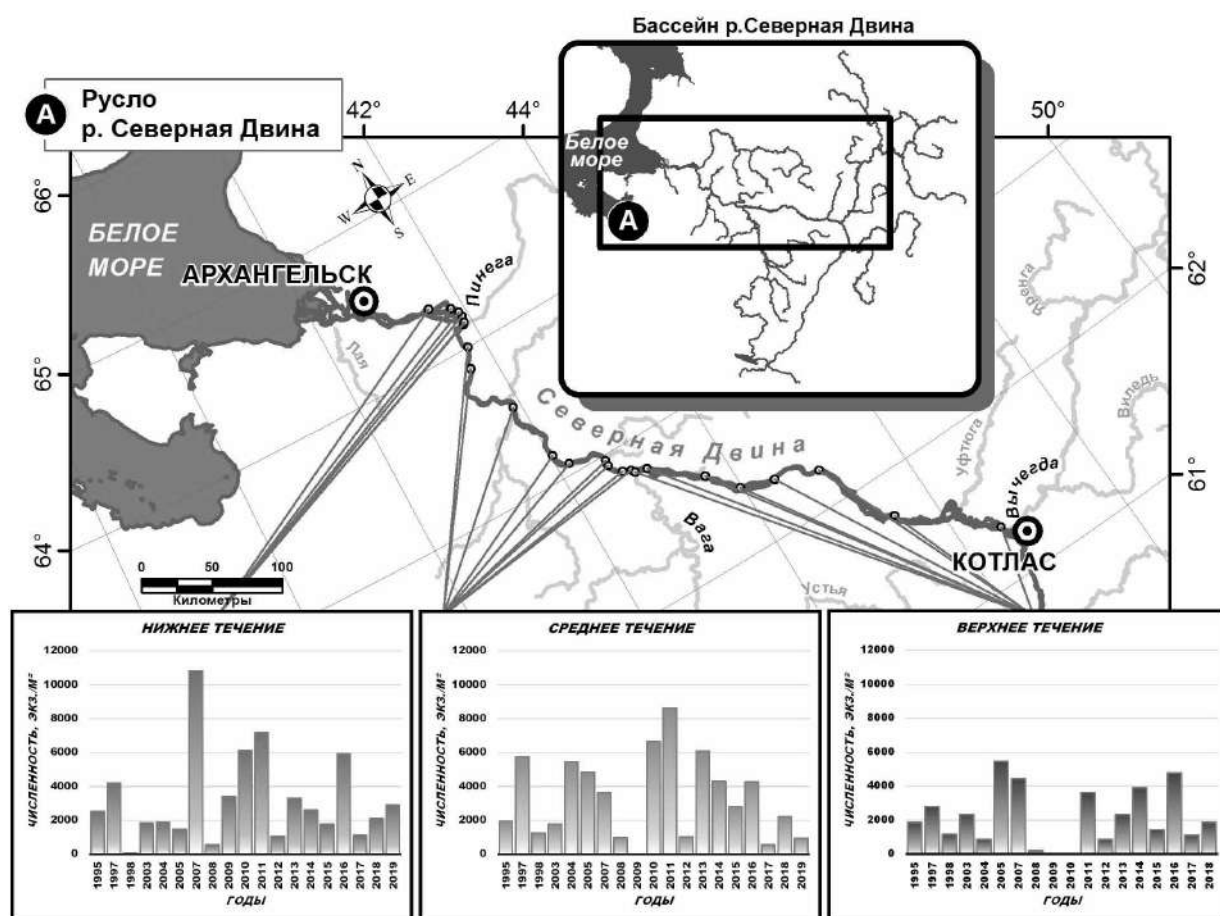
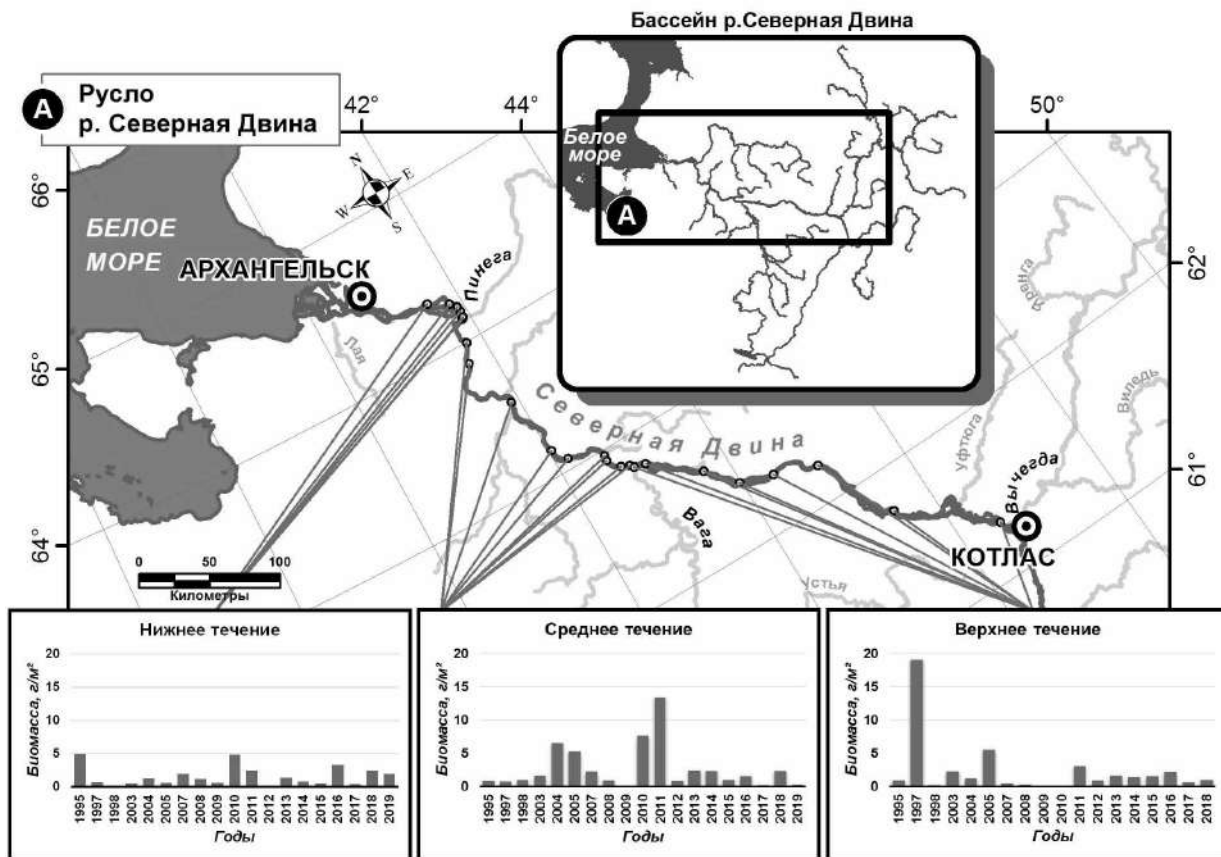


Рис. 2. Численность организмов зообентоса по участкам русла р. Северная Двина в 1995–2019 гг.  
 Fig. 2. Number of zoobenthos organisms by the different parts of mainstream of the Severnaya Dvina River in 1995–2019



**Рис. 3.** Биомасса организмов зообентоса по участкам русла р. Северная Двина в 1995–2019 гг.  
**Fig. 3.** Biomass of zoobenthos organisms by the different parts of mainstream of the Severnaya Dvina River in 1995–2019

течении – 23,8 и 68,8%, в низовьях – 29,8 и 62,8% соответственно. При этом доля малощетинковых червей в формировании общей численности увеличивалась от верховий к нижнему течению. В целом эти 2 таксона формировали от 90,4% общей численности организмов бентоса в верховьях до 92,6% в нижнем и среднем течении.

Наименьшая за весь период наблюдений доля малощетинковых червей в формировании общей численности беспозвоночных бентоса была отмечена в 2007 г. в верхнем течении и составила 2,0%, а наибольшая доля (87,9%) отмечалась в 2008 г. в среднем течении. Наименьшая за весь период наблюдений доля личинок комаров-звонцов (5,9%) была отмечена в 2017 г. в среднем течении р. Северная Двина. Доли других таксонов по разным участкам р. Северная Двина в разные годы наблюдений существенно изменялись. Так, в верхнем течении среднее содержание прочих таксонов в общей численности составило 10,3%. При этом в 1997 г. прочие таксоны в пробах не отмечены вовсе, а в 2018 г. на долю прочих пришлось 25,0%, в том числе на круглых червей

7,9% и на личинок мокрецов – 5,7% общей численности беспозвоночных.

В среднем течении минимальная доля прочих таксонов за весь период наблюдений составила 0,3% в 1995 г., когда долю прочих таксонов формировали круглые черви и двусторчатые моллюски (мелкие формы). В 2017–2019 гг. содержание прочих таксонов резко увеличилось и варьировало в пределах 34,1–39,3%. Из них в 2017 г. на долю личинок мокрецов пришлось 26,3%, а в 2018 и 2019 гг. личинки подёнок сформировали соответственно 17,0 и 24,6% общей численности.

В низовьях реки доля прочих таксонов в формировании общей численности бентоса в среднем за период наблюдений составила 16,0%. При этом в выборках 2005 и 2008 гг. прочие таксоны не были отмечены вовсе, а в 1998 г. на долю прочих пришлось 100% при формировании общей биомассы. Высокая доля прочих таксонов отмечена в 2017 г. – личинки мокрецов сформировали 18,0% общей численности зообентоса.

Биомасса беспозвоночных в русле р. Северная Двина за годы наблюдений варьиро-

вала в очень широких пределах. Изменения биомассы были отмечены в диапазоне от 0,01 г/м<sup>2</sup> в нижнем течении (1998 г.) до 19,10 г/м<sup>2</sup> в верхнем течении в 1997 г. (рис. 3).

На верхнем участке р. Северная Двина средняя биомасса за все годы наблюдений составила 2,63 г/м<sup>2</sup>, варьируя от 0,23 г/м<sup>2</sup> в 1998 г. до 19,10 г/м<sup>2</sup> в 1997 г. В среднем течении реки средний показатель биомассы за период наблюдений составил 2,84 г/м<sup>2</sup>, минимальное значение 0,24 г/м<sup>2</sup> было отмечено в 2017 г., а максимальное – 13,44 г/м<sup>2</sup> – в 2011 г. В низовьях реки средняя биомасса беспозвоночных – 1,58 г/м<sup>2</sup>, пределы варьирования – от 0,01 г/м<sup>2</sup> (1998 г.) до 4,92 г/м<sup>2</sup> (1995 г.).

Основу биомассы на всех участках р. Северная Двина формировали личинки комаров-звонцов и малощетинковые черви. В верхнем течении их совокупная доля в общей биомассе за все годы наблюдений составила в среднем 95,8%, при этом на долю личинок комаров-звонцов пришлось 77,6%, на долю олигохет – 18,2%.

В среднем течении биомасса личинок комаров-звонцов и олигохет в сумме составила 93,7%, в том числе личинок комаров-звонцов – 76,7%, малощетинковых червей – 17,0%. В нижнем течении личинки комаров-звонцов составили 68,8% от общей биомассы беспозвоночных, олигохеты – 17,8%, в сумме на эти 2 таксона пришлось 86,6%. Таким образом, отмечено устойчивое снижение суммарной доли этих двух таксонов от верховий к низовьям реки, причём устойчивое снижение происходило за счёт личинок комаров-звонцов, доля которых уменьшалась от 77,6 до 68,8%.

Доли других таксонов по разным участкам р. Северная Двина в разные годы наблюдений существенно изменялись. Так, в верхнем течении среднее содержание прочих таксонов в общей биомассе составило 9,5%. При этом в 1997 г. прочие таксоны в пробах не отмечены вовсе, а в 1995 г. на долю двустворчатых моллюсков (мелкие формы) и личинок ручейников пришлось 46,3% общей биомассы беспозвоночных. В остальные годы наблюдений доля прочих таксонов на этом участке реки не превышала 22,2%.

В среднем течении доля прочих таксонов за весь период наблюдений составила 10,1%. Минимальное значение (0,1%) отмечено в 1995 г., когда прочие таксоны были представлены только водяными клещами. В 2017–2019 гг. содержание прочих таксонов резко увеличилось. В 2017 г. на долю личинок подёнок и мокрецов пришлось 25,4%, они же в 2019 г.

сформировали 28,9% общей биомассы. Резко выделяется 2018 г., когда на долю брюхоногих моллюсков и личинок подёнок пришлось 74,5% общей биомассы беспозвоночных.

В низовьях р. Северная Двина доля прочих таксонов в формировании общей биомассы бентоса в среднем за период наблюдений составила 24,4%. При этом в выборках 2005 и 2008 гг. прочие таксоны не были отмечены вовсе, а в 1998 г. на долю прочих пришлось 100% при формировании общей биомассы. Высокая доля прочих таксонов отмечена в 1997 г. Личинки ручейников сформировали 75,6% общей биомассы и в 2018 г., когда личинки подёнок и брюхоногие моллюски составили 75,4% общей биомассы зообентоса.

### Заключение

Систематические исследования зообентоса русла р. Северная Двина, начатые в 1995 г., позволили впервые получить наиболее полные сведения о таксономическом составе зообентоса, количестве и частоте встречаемости таксонов по разным участкам русла, численности и биомассе каждого из таксонов. В составе зообентоса за весь период исследований (1995–2019 гг.) было обнаружено 20 таксонов, относящихся к 6 типам и 8 классам беспозвоночных. Среднее количество встречаемых в пробах таксонов беспозвоночных за весь период исследований составило в верхнем и среднем течении р. Северная Двина – 9, в нижнем течении – 8, варьируя в значительных пределах – от 2 до 15 в разные годы.

Ежегодно на всех станциях в пробах встречались малощетинковые черви (*Oligochaeta*) и личинки комаров-звонцов (*Chironomidae*), которые доминировали по частоте встречаемости. Наименьшая частота встречаемости (по 5,3%) обнаружена в верхнем течении р. Северная Двина для личинок веснянок и ногохвосток, в среднем течении – по 5,6% для брюхоногих моллюсков, пиявок, водяных клопов, личинок жуков, куколок мокрецов и мошек. В нижнем течении реки в пробах редко встречались водяные пауки, водяные клопы, личинки жуков, куколки мокрецов и ресничные черви (по 5,3%).

Численность беспозвоночных в русле р. Северная Двина варьировала в очень широких пределах, составив в среднем за весь период наблюдений 3052 экз./м<sup>2</sup>. Наибольший диапазон изменений численности был отмечен в нижнем течении реки, где минимальная для всего русла реки численность в 50 экз./м<sup>2</sup> была



зарегистрирована в 1998 г., а максимальная – 10840 экз./м<sup>2</sup> – в 2007 г. Основу численности на всём протяжении р. Северная Двина формировали малоцетинковые черви и личинки комаров-звонцов.

Средняя биомасса беспозвоночных в русле р. Северная Двина составила 2,35 г/м<sup>2</sup>. Изменения биомассы были отмечены в диапазоне от 0,01 г/м<sup>2</sup> в нижнем течении в 1998 г. до 19,10 г/м<sup>2</sup> в верхнем течении в 1997 г. Основу биомассы также повсеместно формировали малоцетинковые черви и личинки комаров-звонцов.

*Работа выполнена в рамках государственного мониторинга водных биологических ресурсов и среды их обитания. Авторы благодарят инженера Северного филиала ФГБНУ «ВНИРО» А.Л. Левицкого за подготовку рисунков.*

### Литература

1. Величковский В.А. Моллюски окрестностей Архангельска // Труды Государственного полярного химико-бактериологического института. Т. I. Архангельск: издание Химико-бактериологического института, 1927. С. 147–151.
2. Семерной В.П. Бентос приустьевого загрязняемого участка Северной Двины // Современные проблемы биологии, экологии, химии и экологического образования: Материалы Междунар. науч.-практ. конф., посвящ. 40-летию фак. биологии и экологии Ярослав. гос. ун-та им. П.Г. Демидова. Ярославль: ЯрГУ им. П.Г. Демидова, 2011. С. 137–142.
3. Семерной В.П., Воропаева О.Г., Верховцева Н.В., Верина О.В., Еремейшвили А.В. Организация и результаты гидробиологического мониторинга в устье Северной Двины // Проблемы охраны природы: тезисы докладов Всероссийской конференции. Байкальск, 1984. С. 29–30.
4. Соколова В.А. Биоценозы бентоса устьевого участка реки Северной Двины // Водные ресурсы Карелии и пути их использования. Петрозаводск: Карелия, 1970. С. 136–146.
5. Попченко В.И. К познанию фауны малоцетинковых червей р. Северная Двина // Гидробиологический журнал. 1969. Т. 5. № 5. С. 92–96.
6. Семерной В.П. Об индикаторном значении *Aulophorus furkatus* (Müller) (Oligochaeta, Naididae) // Проблемы экологии Прибайкалья: тезисы докладов Всесоюзной научной конференции. Иркутск: Иркутский государственный университет им. А.А. Жданова, 1982. С. 55.
7. Кучина Е.С. К вопросу о распространении моллюска *Dreissena polymorpha* Pallas в р. Северной Двине // Биология дрейссены и борьба с ней. М.-Л.: Наука, 1964. С. 31–37.

8. Махнович Н.М. Исследование *Dreissena polymorpha* (Pallas, 1771) как объекта биомониторинга в устье реки Северная Двина // Проблемы региональной экологии. 2016. № 1. С. 39–43.

9. Махнович Н.М. Характеристика популяции *Dreissena polymorpha* (Pallas, 1771) в устьевой области реки Северная Двина // Проблемы региональной экологии. 2018. № 2. С. 68–72.

10. Попченко В.И. Генезис фауны малоцетинковых червей севера Европы // Известия Самарского научного центра РАН. 1999. № 1. С. 128–133.

11. Студёнова М.А., Студёнов И.И., Чупов Д.В., Самодов А.С. Зообентос дельты реки Северная Двина // Теоретическая и прикладная экология. 2021. № 2. С. 60–65.

12. Гидрологическая изученность. Ресурсы поверхностных вод СССР. Северный край. Л.: Гидрометеиздат, 1965. Т. 3. 612 с.

13. Ресурсы поверхностных вод СССР: Гидрологическая изученность. Т. 3. Северный край / Под ред. И.М. Жила, Н.М. Алюшинской. Л.: Гидрометеиздат, 1972. 664 с.

14. Методика изучения биогеоценозов внутренних водоёмов. Москва: Наука, 1975. С. 158–216.

15. Определитель пресноводных беспозвоночных европейской части СССР. Л.: Гидрометеиздат, 1977. 512 с.

16. Студёнова М.А., Шерстков В.С. Зообентос пресноводных водных объектов Севера России // Свидетельство о государственной регистрации базы данных № RU 2017620660. Заявление: 2017620346, 21.04.2017. Дата публикации: 20.06.2017 [Электронный ресурс] <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=39366178> (Дата обращения: 17.04.2023).

### References

1. Velichkovsky V.A. Mollusks of the vicinity of Arkhangelsk // Trudy Gosudarstvennogo polyarnogo khimiko-bakteriologicheskogo instituta. V. I. Arkhangelsk: Izdanie Khimiko-bakteriologicheskogo instituta, 1927. P. 147–151 (in Russian).
2. Semernoy V.P. Benthos of the estuarine polluted area of the Northern Dvina // Modern problems of biology, ecology, chemistry and environmental education: materialy Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii. 2011. P. 137–142 (in Russian).
3. Semernoy V.P., Voropaeva O.G., Verhovtseva N.V., Verina O.V., Eremeyshvili A.V. Organization and results of hydrobiological monitoring at the mouth of the Severnaya Dvina river // Problems of nature protection: Tezisy докладov Vsesoyuznoy konferentsii. Baykalsk, 1984. P. 29–30 (in Russian).
4. Sokolova V.A. The benthos biocenoses of the mouth section of the Severnaya Dvina River // Water resources of Karelia and ways of their use. Petrozavodsk: Karelia, 1970. P. 136–146 (in Russian).

5. Popchenko V.I. To the knowledge of fauna of oligochaete of the Severnaya Dvina river // Hydrobiological Journal. 1969. V. 5. No. 5. P. 92–96 (in Russian).
6. Semernoy V.P. About the indicator value of *Aulophorus furkatus* (Müller) (Oligochaeta, Naididae) // Environmental problems of Pribaikalye: Tezisy докладov vsesoyuznoy nauchnoy konferentsii. Irkutsk: Irkutskiy gosudarstvennyy universitet im. A.A. Zhdanova, 1982. P. 55 (in Russian).
7. Kuchina E.S. On the issue of the distribution of the mollusk *Dreissena polymorpha* Pallas in the Severnaya Dvina River // Biology is drayssen and the fight against it. Moskva-Leningrad: Nauka, 1964. P. 31–37 (in Russian).
8. Makhnovich N.M. Study of *Dreissena polymorpha* (Pallas, 1771) as a biomonitoring facility at the mouth of the Northern Dvina River // Problems of Regional Ecology. 2016. No. 1. P. 39–43 (in Russian).
9. Makhnovich N.M. Characterization of *Dreissena polymorpha* (Pallas, 1771) population in the mouth part of the Severnaya Dvina River // Problems of Regional Ecology. 2018. No. 2. P. 68–72 (in Russian).
10. Popchenko V.I. Genesis of fauna of oligochaete of Northern Europe // News of the Samara Scientific Center of the Russian Academy of Sciences. 1999. No. 1. P. 128–133 (in Russian).
11. Studenova M.A., Studenov I.I., Chupov D.V., Samodov A.S. Zoobentos of the Severnaya Dvina River Delta // Theoretical and Applied Ecology. 2021. No. 2. P. 60–65 (in Russian). doi: 10.25750/1995-4301-2021-2-060-065
12. Hydrological study. Surface water resources of the USSR. Northern Region. Leningrad: Gidrometeoizdat, 1965. V. 3. 612 p. (in Russian).
13. Surface water resources of the USSR: Hydrological study. V. 3. Northern Region / Eds. I.M. Zhila, N.M. Alyushinskaya. Leningrad: Gidrometeoizdat, 1972. 664 p. (in Russian).
14. Method of studying biogeocenoses of internal water bodies. Moskva: Nauka, 1975. P. 158–216 (in Russian).
15. Identification guide of freshwater invertebrates of the European part of the USSR. Leningrad: Gidrometeoizdat, 1977. 512 p. (in Russian).
16. Studenova M.A., Sherstkov V.S. Zoobentos of freshwater bodies of the North of Russia // Certificate of state registration of the database No. RU 2017620660. Application: 2017620346, 21.04.2017. Date of publication: 20.06.2017 [Internet resource] <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=39366178> (Accessed: 17.04.2023) (in Russian).

## Состояние лиственничников и перспективы выращивания лиственницы сибирской в подзоне хвойно-широколиственных лесов

© 2023. Н. П. Савиных, д. б. н., профессор,  
А. А. Тетерин, аспирант,  
Вятский государственный университет,  
610000, Россия, г. Киров, ул. Московская, д. 36,  
e-mail: savva\_09@mail.ru, teterin-andrej@yandex.ru

С позиций экосистемных услуг леса согласно лесоводственным, геоботаническим и эколого-ценотическим характеристикам в сравнении с нормальными древостоями изучены на примере модельных площадок искусственно созданные насаждения *Larix sibirica* Led. в возрасте 52 лет. Установлено соответствие лиственничных древостоев нормальным древостоям; большой запас древесины по сравнению с основными лесообразующими породами региона; тенденция естественной трансформации в леса с большим участием ели из-за высокой плотности древостоя; наличие охраняемых видов. Сделаны выводы о возможности и целесообразности использования *Larix sibirica* Led. в воспроизводстве лесов региона с повышением ресурсных, обеспечением поддерживающих и сохраняющих функций лесов. Предложено для предотвращения трансформации лиственничных лесов в леса с елью поддерживать необходимую освещённость с использованием полного комплекса рубок ухода за лесом, особенно прореживания и проходных.

**Ключевые слова:** *Larix sibirica* Led., лиственница сибирская, продуктивность древостоя, эколого-ценотические группы, биоразнообразие, экосистемные услуги леса.

## The state of larch forests and prospects for growing Siberian larch in the subzone of coniferous-deciduous forests

© 2023. N. P. Savinykh ORCID: 0000-0003-4996-8269  
A. A. Teterin ORCID: 0000-0003-2729-6609  
Vyatka State University,  
36, Moskovskaya St., Kirov, Russia, 610000,  
e-mail: savva\_09@mail.ru, teterin-andrej@yandex.ru

For the sustainable development of society, timely and high-quality reproduction of forests is necessary with the preservation of ecosystem functions at the expense of economically valuable species, such as *Larix sibirica* Led. The aim of the work is to study the composition and structure of artificially created larch forests in the subzone of broadleaf-coniferous forests of the Kirov Region to find out the possibility, expediency and features of them for the conservation and maintenance of biodiversity, as well as timber resources. Communities were characterized from these positions by traditional silvicultural, geobotanical, ecological, and cenotic characteristics. The state of the stand was evaluated in comparison with normal stands according to M.M. Orlov. It was found that: 1) Larch stands mainly correspond to the values of normal stands of this age and are distinguished by a greater stock of wood than forests of the main forest-forming species of the region. 2) There is a tendency of natural transformation of larch forests into forests with greater participation of spruce: large undergrowth of *Picea abies* L., *Abies sibirica* Ledeb., *Betula pendula* L.; presence of boreal species in underbrush: *Sorbus aucuparia* L., *Rubus idaeus* L.; prevalence of boreal ecological and cenotic group (EEC) among herbs; moss cover of taiga species. 3) The main reason for community change is high density of stands. 4) Presence of non-moral ECG species, including *Convallaria majalis* L., which is protected in Kirov region. Increase of resource, supporting and preserving functions of forest ecosystems in the sub-zone of broadleaf-coniferous forests of Kirov region is possible and expedient by using *L. sibirica* in forest reproduction. To prevent transformation of larch forests into forests with spruce it is necessary to maintain illumination, for which purpose it is expediente carry out a full complex of forest maintenance cuts, especially thinning and pass logging.

**Keywords:** *Larix sibirica* Led., Siberian larch, the productivity of the stand, ecological-cenotic groups, biodiversity, ecosystem services of the forest.

В связи с высокими темпами использования древесных ресурсов в мире и глобальными изменениями климата важнейшей задачей устойчивого развития общества сегодня является своевременное качественное воспроизводство лесов с сохранением биологического разнообразия, повышением ресурсного и рекреационного потенциала, обеспечением поддерживающей и регулирующей функций этих фитоценозов [1]. Признано, что восстановление лесов целесообразнее проводить в первую очередь хозяйственно-ценными видами деревьев. Из хвойных представителей в России наиболее высокими показателями продуктивности, качества древесины, синтеза и содержания ценных, в том числе лекарственных веществ, устойчивости к биотическим и абиотическим факторам среды, многообразием средообразующих функций обладает лиственница сибирская (*Larix sibirica* Led.) [2]. Известно, что запас древесины на отдельных участках в знаменитой Линдуловской роще, созданной в 1738 г., достигает 1500 м<sup>3</sup>/га, а под пологом сформировались условия, благоприятные для существования богатой флоры и фауны [3]. *Larix sibirica* – один из наиболее распространённых лесообразующих видов в России: лиственничники занимают 41,6% покрытой лесом площади страны [2]. В Кировской области встречается экотип этого вида, часто выделяемый в самостоятельный таксон, – *L. rossica* (Rgl.) Trautv. – лиственница русская, Сукачёва. Здесь она активно возобновляется, особенно в сосняках на песчаных почвах. Среди лесов региона есть участки разновозрастных лиственничников, возможно, естественного происхождения, особенно вдоль реки Вятки. По нашим наблюдениям, они представлены полноценными продуктивными лесами с элементами борového и неморального эколого-ценотических комплексов. В связи с этим данные сообщества включены в перечень высоких природоохранных ценностей региона [4].

Из-за уникальных полезных свойств и широкого использования у видов рода *Larix* активно изучают генетическую изменчивость [5, 6], специфику древесины у растений разного возраста [7], варьирование в строении шишек [8], экологические реакции особей начальных этапов онтогенеза на изменения условий среды [9], фенологию [10], лесовосстановление и специфику прорастания пыльцы [11, 12], особенности семеноводства [13, 14], таксационные показатели разных по породному составу искусственно созданных

лиственничников [15]. Состояние таких лесов изучено в разных регионах России: Татарстане [16], Мордовии [17], на Алтае в Приобье [18], Подмосковье [19], Нижегородской области [15] и др. При характеристике сообществ рассматриваются, главным образом, лесоводственные характеристики с позиций ресурсного потенциала: особенности формирования и состояния древостоя, схема и густота посадки, приживаемость лесных культур, состав насаждения, продуктивность. В работах отмечается возможность формирования высокопродуктивных лесов. Другие особенности подобных сообществ, в том числе с геоботанических и эколого-ценотических позиций, изучены недостаточно.

Кировская область является одним из крупнейших лесных регионов Европейской России. Площадь земель, занятых лесами, составляет около 8,14 млн га (62,7% территории). Размер общей расчётной лесосеки – 15,8 млн м<sup>3</sup>. Ежегодно в последние 10 лет вырубалось от 7,8 до 10,4 млн м<sup>3</sup>. По объёмам заготовки древесины регион занимает 5-е место среди субъектов Российской Федерации (РФ). В связи с этим проблема восстановления высокопродуктивных лесов здесь своевременна и актуальна. Для её комплексного решения среди прочих задач необходимо изучить состояние искусственно созданных древостоев из хозяйственно-ценных пород, в том числе не являющихся основными лесообразующими в регионе, среди которых – *L. sibirica*.

Работы по созданию древостоев разного состава через лесные культуры особенно активно проводились кировскими лесоводами в середине прошлого века. В Малмыжском, Уржумском, Нолинском и других районах в 50–60-е гг. была посажена и лиственница сибирская. К настоящему времени на месте посадок сформировались самостоятельные лесные насаждения. В них, согласно таксационным описаниям и другим архивным данным, почти не проводились никакие лесохозяйственные мероприятия. Состояние фитоценозов также не изучалось. Поэтому в соответствии с указанными выше тенденциями и подходами целью данного исследования было изучить состав и строение искусственно созданных лиственничников в подзоне хвойно-широколиственных лесов Кировской области с геоботанических, эколого-ценотических и лесоводственных подходов, сравнить особенности их и нормальных насаждений для выяснения возможности, целесообразности и особенностей формирования таких сообществ

для сохранения и поддержания биоразнообразия, воспроизводства ресурсов древесины региона.

### Материалы и методы исследования

В качестве объектов исследования на территории Кировской области выбраны насаждения *L. sibirica*. В статье представлены данные о двух типичных для подзоны хвойно-широколиственных лесов модельных сообществах. Они расположены в 77 квартале Лудянского сельского участкового лесничества Нюлинского лесничества (лесной район хвойно-широколиственных (смешанных) лесов Европейской части РФ; подзона подтаёжных лесов по геоботаническому районированию. Здесь, между полем, зарастающим берёзой (*Betula pendula* L.), осинкой (*Populus tremula* L.), сосной обыкновенной (*Pinus sylvestris* L.) и елью европейской (*Picea abies* L.) с юго-запада, и еловым лесом кисличным с пихтой (*Abies sibirica* Ledeb.) и сосной (согласно таксационному описанию, состав древостоя – 6ЕЗП1С+Б, возраст 84 лет, тип лесорастительных условий С<sub>2</sub>; почвы с богатством выше среднего и влажностью, достаточной для большинства растений в сообществе), расположены искусственно сформированные лесные участки из сосны сибирской (*Pinus sibirica* (Rupr.) Mayr.) и сосны обыкновенной, лиственницы сибирской, а также лиственницы с сосной обыкновенной. Почва в основном дерново-подзолистая супесчаная, хорошо дренированная. В лиственничниках выделов 22 (57°59'31" с. ш., 49°74'91" в. д.) и 23 (57°59'25" с. ш. и 49°74'99" в. д.) заложены две пробные площади (ПП 1 и ПП 2) размерами 50 м × 40 м в наиболее типичных для целостных сообществ местах.

**Пробная площадь 1** (выдел 22). По видовому составу древостоя сообщество представлено лиственничником с присутствием единичных берёз (*B. pendula* L.) возрастом 30–40 лет, выросших из семян, занесённых с соседних участков. Общее число деревьев лиственницы – 1090 шт./га, поэтому сохранность лесных культур 17,4%. Средний диаметр ствола составляет 18,1 см; средняя ступень толщины «20» представлена 61 деревом, наименьшая – «8» – 4 деревьями, наибольшая – «40» – 3. Средняя высота дерева – 24,0 м – колеблется от 22,5 м до 25,3 м. Общий запас древесины – 470 м<sup>3</sup>/га. Средний класс бонитета 1а (табл. 1).

**Пробная площадь 2** (выдел 23). Сообщество площадью в 2 га создано в том же 1968 г.,

также посадкой сеянцев лиственницы сибирской в дно плужных борозд на участке с ровным рельефом. Густота посадки – 4166 шт./га (табл. 1). Исходное сообщество и окружение то же, что и у ПП 1. Мероприятия по уходу за посадками также не проводили.

По составу древостоя фитоценоз представляет собой лиственничник, но с присутствием единичных деревьев ели обыкновенной, выросших из семян растений с соседних участков. В ходе натурных исследований на участке выявлено 765 лиственниц в пересчёте на один га с сохранностью лесных культур в 18,3%. Средний диаметр ствола дерева 19,7 см. Средняя ступень толщины «16» представлена 32 особями; с наименьшей ступенью толщины «8» – 12, с наибольшей – «40» четыре дерева. Средняя высота лиственниц – 24,0 м (колеблется от 23,1 до 25,3 м). Общий запас древесины 325 м<sup>3</sup>/га. Средний класс бонитета 1а (табл. 1).

Для оценки экосистемных услуг сообщества изучены с лесоводственных, геоботанических и эколого-ценотических позиций. Основные лесоводственные характеристики, особенности и состав лесных участков определены по таксационным описаниям разных лет и в ходе натурального обследования. Таксационные показатели древостоя в природе определены по традиционным методикам исследований лесных экосистем [20]. Для этого проведён сплошной перебор деревьев и установлены основные характеристики древостоя: диаметр и высота растущих деревьев; возраст, бонитет и полнота насаждения; тип леса, запас древесины. У преобладающих ступеней толщины деревьев измерены высоты. Как один из важных и информативных ценотических факторов, обеспечивающих степень заполнения пространства деревьями и интенсивность конкурентных взаимоотношений между ними, определена густота насаждений. Состояние древостоя оценивали согласно нормативно-справочным материалам «Таблицы и модели хода роста и продуктивности насаждений основных лесообразующих пород Северной Евразии» [21] и в сравнении с нормальными древостоями (термин М.М. Орлова) [22], как сообществами, максимально использующими природные ресурсы и имеющими в данных условиях наибольшую производительность. У показателей высоты и диаметра стволов деревьев определены средние, минимальные и максимальные значения. В ходе полевых работ использовали текстолитовую мерную

вилку, ультразвуковой высотомер, дальномер, угломер VERTEX IV.

В соответствии с геоботаническими методиками исследований [23] на ПП отмечены состав древостоя по преобладающим в фитоценозе видам, наличие и состояние подроста, состав травянисто-кустарничкового яруса, мохового покрова; сделаны прикопки для определения особенностей почв.

Для определения степени сформированности целостного лесного сообщества установлен спектр эколого-ценотических групп (ЭЦГ) растений как групп видов, сходных по отношению к совокупности экологических факторов и отражающих особенности ландшафтно-экологических условий среды [24, 25]. Все полученные данные соотнесены при обсуждении результатов.

### Результаты и обсуждение

В ходе полевых исследований и камеральных работ получены данные о составе и состоянии древостоя, подростка, травяно-кустарничкового яруса, спектре ЭЦГ лиственных искусственного происхождения в подзоне хвойно-широколиственных лесов в Кировской области.

**Пробная площадь 1** (выдел 22). Лесные культуры площадью 0,5 га созданы на участке берёзового мелколесья с ровным рельефом 55 лет назад (в 1968 г.) посадкой семян лиственницы сибирской в дно плужных борозд. Первоначальная густота посадки – 6250 шт./га (табл. 1). Мероприятия по уходу в этих насаждениях, согласно таксационным описаниям, не проводились.

Согласно [17], леса 1а класса бонитета возрастом 50 лет характеризуются наличием 850 деревьев на 1 га со средней высотой 22,0 м, средним диаметром ствола 23,9 см; запасом стволовой древесины 409 м<sup>3</sup>/га (табл. 1). По сравнению с этими данными деревья на ПП1 выше на 2,0 м; но у них меньше показатели: диаметр – на 5,8 см; средний объём древесины на одну особь – на 0,05 м<sup>3</sup>/га; прирост древесины в год – на 0,14 см. Однако запас древесины больше на 61 м<sup>3</sup>/га.

Это определяется, на наш взгляд, прежде всего, густотой древостоя, значение которой превышает этот показатель в нормальных лиственных насаждениях на 240 шт. (28%). При этом качество древесины ниже из-за меньшего диаметра стволов. Основной причиной такого состояния древостоя, вероятней всего, является отсутствие на протяжении

всего периода развития лесных культур каких-либо рубок ухода в них.

В подросте отмечены единичные особи основных лесообразующих пород региона – пихты, ели и берёзы (табл. 1). Подрост редкий (менее 500 шт./га), крупный – со средней высотой 1,5 м.

Из кустарников отмечен представитель боровой ЭЦГ можжевельник обыкновенный (*Juniperus communis* L.), что может свидетельствовать о возможном существовании на данной территории в прошлом, до рубки леса, сосняка можжевельникового.

В составе сообщества на ПП1 присутствуют виды 6 ЭЦГ (табл. 2). Подлесок представлен можжевельником обыкновенным (боровая ЭЦГ). Общий спектр ЭЦГ травяно-кустарничкового яруса по числу видов в этом сообществе следующий: бореальная – 5 видов (55,5%): один – из группы вечнозелёных трав (11,1% от общего числа) и четыре (44,4%) – бореального мелкотравья; неморальная – два представителя (22,2%); по одному виду из луговой и лугово-опушечной групп и высокотравной (по 11,2%). Присутствие *Fragaria vesca* L. из лугово-опушечной ЭЦГ, а также *Urtica dioica* L. из высокотравья определяется нарушением фитоценоза, возможно, при вырубке леса и подготовке почвы к посадке при лесовосстановлении.

Наличие неморальной ЭЦГ из *Aegopodium podagraria* и *Convallaria majalis* позволяет предполагать, что исходное сообщество по составу трав могло быть и сосняком сложным, которые не редки в районе исследования [26]. Но подрост из ели и пихты, а также виды бореальной группы: вечнозелёные травы (*Pyrola media* Sw.) и бореальное мелкотравье: *Equisetum sylvaticum* L., *Oxalis acetosella* L., *Rubus saxatilis* L., *Gymnocarpium dryopteris* L. – свидетельствуют об антропогенном воздействии и естественной трансформации таких сложных боров в леса с большим участием ели уже в течение длительного времени. На это же указывает состав мохового покрова из *Pleurozium schreberi* Mitt и *Polytrichum commune* Hedw. Подобные сосновые леса со значительным бореальным элементом в их составе также обычны в районе исследования [26]. При преобладании в составе древостоя по числу особей ели, являясь по сути сосново-еловыми, такие сообщества по-прежнему указываются в таксационных описаниях без учёта стадии сукцессии – по запасу древесины – как сосновые.

Таким образом, за 50 лет в результате искусственного восстановления сформировался

Таблица 1 / Table 1

Характеристика исследованных пробных площадок (ПП)  
Characteristics of the trial sites (TS)

Признак Feature	ПП 1 TS 1	ПП 2 TS 2	Нормальный древостой Normal stand
Шаг посадки, м / Planting step, m	0,8	0,8	–
Расстояние между центрами борозд, м Distance between groove centers, m	2,0	3,0	–
Число сеянцев, шт./га / Number of seedlings, pieces/ha	6250	4166	–
Сохранность лесных культур, % Conservation of forest crops, %	17,4	18,3	–
Густота, шт./га / Density, pieces / ha	1090	765	850
Высота, м / Height, m	24	24	22,0
Средний диаметр, см / Average diameter, cm	18,1	19,7	23,9
Запас древесины, м <sup>3</sup> /га / Wood stock, m <sup>3</sup> /ha	470	325	409
Бонитет / Bonitet	1a	1a	1a
Средний объём древесины одного дерева, м <sup>3</sup> Average volume of wood per tree, m <sup>3</sup>	0,43	0,42	0,48
Средний прирост древесины, см/год Average timber growth, cm/year	0,34	0,37	0,48
Подрост на ПП, видовой состав The undergrowth on the TS, species composition	пихта, ель, берёза fir, spruce, birch		–
Спектр ЭЦГ кустарников ECG spectrum of the shrubs	1Pn	1Pn 1 Br 1 BrH	–
Спектр ЭЦГ травяно-кустарничкового яруса ECG spectrum of the grass-dwarf shrub layer	1Br_k 4 Br_m 2 Nm 1 Md 1 Hh	1Br_k 5 Br_m 3 Nm 1 Md 1 Hh	–

Примечание: ЭЦГ – эколого-ценотические группы: Br – бореальная (виды растений, приуроченные к сообществам сомкнутых темнохвойных лесов); Br\_k – бореальная (кустарнички и вечнозелёные травы); Br\_m – бореальная (мелкотравье); Pn – боровая (виды растений, произрастающие в сомкнутых сосновых лесах северной части лесного пояса); Nm – неморальная (виды растений, произрастающие в сомкнутых широколиственных лесах); BrH – бореальная опушечная высокотравная (виды растений, произрастающие в окнах темнохвойных лесов и на опушках); MD – луговая и лугово-опушечная (виды сухих лугов). Цифрой в спектре ЭЦГ указано число видов этой группы. Прочерк – отсутствие данных.

Note: ECG – ecological-coenotic groups: Br – boreal (plant species associated with closed dark coniferous forest communities); Br\_k – boreal (dwarf shrubs and evergreen herbs); Br\_m – boreal small herbs and ferns; Pn – piny group (plant species found in closed pine forests in the northern part of the forest belt); Nm – nemoral (plant species growing in closed broad-leaved forests); BrH – boreal forest edge high-grass (plant species growing in the windows of dark coniferous forests and edges); MD – meadow and meadow-edge groups (dry meadows species). The number in the ECG spectrum indicates the number of species in this group. A dash means no data.

лиственничник, параметры которого в основном соответствуют нормальному насаждению этого возраста. В сообществе поддерживается состав типичных бореальных видов лесов региона и, что особенно важно, можжевельника из боровых и двух неморальных видов, в том числе охраняемого в Кировской области *Convallaria majalis*. Возможно, при соответствующих рубках ухода на таких участках в этих лесорастительных условиях можно сформировать неизвестные сейчас в Кировской области уникальные лесные сообщества – лиственничники ландышевые. Как и ландышевые боры, они будут не только высокопродуктивными лесами, но и обеспечат, наряду с ресурсной,

другие важнейшие экосистемные функции – поддержание и сохранение биоразнообразия.

**Пробная площадь 2** (выдел 23). По сравнению с нормальными древостоями [24], в этом сообществе больше необходимого значения один показатель – высота деревьев – на 2 м; меньше – диаметр ствола на 4,2 см; запас древесины на 84 м<sup>3</sup>/га; число деревьев на 1 га – на 85 шт. Продуктивность насаждения определяется, по-видимому, низкой густотой древостоя из-за гибели большей части посадочного материала и, возможно, низким его качеством. Пересчёт запасов на необходимое число деревьев на 1 га (850 шт.) также не демонстрирует необходимого значения

запасов древесины (361 м<sup>3</sup>/га вместо 409). По-видимому в данном случае на густоту древостоя повлияло и снижение числа посадочного материала по сравнению с ПП 1, и отсутствие мероприятий по уходу. Но бонитет насаждения не отличается. При меньшей густоте древостоя диаметр ствола деревьев выше, чем на ПП 1 на 1,6 см; незначительно, но выше, прирост древесины в год (0,34 и 0,37 см соответственно), что свидетельствует о возможно более высоком качестве её на этом участке. Поэтому можно прогнозировать успешное дальнейшее развитие древостоя и в таких сообществах, но при проведении необходимых мероприятий по уходу.

В подросте отмечены также все основные лесообразующие породы региона: пихта сибирская, ель обыкновенная, берёза. Подрост, как и на ПП1 редкий, менее 500 шт./га, крупный – средней высотой 1,5 м.

Среди кустарников, наряду с боровым *J. communis*, отмечены бореальная *Sorbus*

*aucuparia* L. и бореально-опушечная *Rubus idaeus* L. Это свидетельствует о начавшейся естественной трансформации лиственничника подобно соснякам [17, 18]: зарастанию бореальными видами кустарников и трав, елью с последующим преобразованием в лес с елью. В составе травянистого яруса выше доля неморальной группы: вместе с *A. podagraria* и *C. majalis* присутствует типичный для ельников-кисличников *Asarum europaeum* L. Бореальная ЭЦГ пополняется типичным видом бореального мелкотравья – *Trientalis europaea* L. Состав мохового покрова тот же. Поэтому спектр ЭЦГ травянистого яруса (11 видов) этой ПП следующий: бореальная – 6 видов (54,5%): один – из группы вечнозелёных трав (9% от общего числа) и 5 (45,5%) бореального мелкотравья; неморальная – три (27,2%); по одному виду из луговой и лугово-опушечной групп и высокотравной (по 9,2%). Идентичность спектров ЭЦГ обусловлена нахождением

Таблица 2 / Table 2

Эколого-ценоотические группы растений пробных площадок (ПП)  
Ecological-coenotic groups of plants from the trial sites (TS)

Виды растений Plant species	ПП 1 (13 видов) TS 1 (13 species)	ПП 2 (17 видов) TS 2 (17 species)
Подрост / The teenager		
Пихта сибирская – <i>Abies sibirica</i> Ledeb.	Br	Br
Берёза повислая – <i>Betula pendula</i> Roth	Br	Br
Ель обыкновенная – <i>Picea abies</i> L.	Br	Br
Подлесок / The underbrush		
Можжевельник обыкновенный – <i>Juniperus communis</i> L.	Pn	Pn
Малина обыкновенная – <i>Rubus idaeus</i> L.		BrH
Рябина обыкновенная – <i>Sorbus aucuparia</i> L.		Br
Травянистый ярус / Grassy layer		
Сныть обыкновенная – <i>Aegopodium podagraria</i> L.	Nm	Nm
Копытень европейский – <i>Asarum europaeum</i> L.		Nm
Ландыш майский – <i>Convallaria majalis</i> L.	Nm	Nm
Хвощ лесной – <i>Equisetum sylvaticum</i> L.	Br_m	Br_m
Земляника лесная – <i>Fragaria vesca</i> L.	Md	Md
Кислица обыкновенная – <i>Oxalis acetosella</i> L.	Br_m	Br_m
Грушанка средняя – <i>Pyrola media</i> Sw.	Br_k	Br_k
Костяника каменистая – <i>Rubus saxatilis</i> L.	Br_m	Br_m
Седмичник европейский – <i>Trientalis europaea</i> L.		Br_m
Крапива двудомная – <i>Urtica dioica</i> L.	Hh	Hh
Папоротники / Ferns		
Голокучник обыкновенный – <i>Gymnocarpium dryopteris</i> L.	Br_m	Br_m
Спектр ЭЦГ / ECG spectrum	1Pn 1Br_k 4 Br_m 2 Nm 1 Md 1 Hh	1Pn 1 Br 1 BrH 1Br_k 5 Br_m 3 Nm 1 Md 1 Hh

Примечание: аббревиатура для ЭЦГ та же, что в таблице 1.  
Note: the abbreviation for ECG is the same as in table 1.



этих двух ПП на одной территории в сходных условиях.

Таким образом, в подзоне хвойно-широколиственных лесов на территории Кировской области формируются лиственничники, близкие по основным характеристикам к нормальным насаждениям из этого вида. При этом средний запас древесины в них почти в два раза превышает аналогичные показатели древостоев сосны (218 м<sup>3</sup>/га), ели (239 м<sup>3</sup>/га) и берёзы (209 м<sup>3</sup>/га) в спелых и перестойных хвойных лесах региона (согласно Лесному плану Кировской области, утверждённому Указом Губернатора Кировской области от 29.12.2018 № 165). Это свидетельствует в пользу выращивания лесов из *L. sibirica* для лучшего выполнения ими ресурсных функций.

Дерново-подзолистая супесчаная хорошо дренированная почва в достаточной мере удовлетворяет потребности *L. sibirica* в её плодородии. Исследованные сообщества объединены бореальной ЭЦГ растений, отражающей особенности ландшафтно-экологических условий в Кировской области. Вместе с тем на таких участках поддерживается разнообразие ряда не только бореальных и боровых, но и неморальных видов лесных экосистем. Формирование лиственничных лесных насаждений не только повысит запасы высокоценной древесины, но и обеспечит сохранение биоразнообразия, что, в свою очередь, усилит не только ресурсную, но и поддерживающую функцию лесных экосистем как в регионе, так и в подзоне хвойно-широколиственных лесов в целом.

Для предотвращения трансформации лиственничников и формирования зональных ельников в результате возможных изменений фитоценозов необходимо проведение своевременных лесохозяйственных мероприятий, направленных в первую очередь на регулирование густоты. Среди них – весь комплекс рубок ухода за лесом, особенно прореживание и проходные рубки. Для оценки биоразнообразия необходим мониторинг видового состава сообществ и разработка мер по поддержанию и сохранению ценопопуляций, особенно редких и охраняемых растений (при наличии), а также видов неморальной ЭЦГ.

### Заключение

В подзоне хвойно-широколиственных лесов возможно выращивание полноценных лиственничных лесов.

Воспроизводство лесов в подзоне хвойно-широколиственных лесов Кировской области

за счёт *L. sibirica* способно повысить их ресурсные функции.

Создание лиственничников в подзоне хвойно-широколиственных лесов будет способствовать сохранению биоразнообразия, в том числе редких и охраняемых неморальных видов трав.

Воспроизводство лиственничников должно сопровождаться необходимыми мероприятиями по уходу, поддержанию необходимого светового режима (прореживание и проходные рубки), контролю за проникновением бореального элемента в состав сообщества и предотвращения трансформации его в менее продуктивные зональные ельники.

### Литература

1. Карпачевский М.Л., Тепляков В.К., Яницкая Т.О., Ярошенко А.Ю. Основы устойчивого лесопользования. М.: Всемирный фонд дикой природы (WWF), 2009. 143 с.
2. Карасёва М.А. Лиственница сибирская в Среднем Поволжье. Йошкар-Ола: МарГТУ, 2003. 376 с.
3. Амирханов Л.И. Блеск и нищета Линдуловской рощи. СПб.: ООО «Издательский центр «Остров», 2019. 80 с.
4. Савиных Н.П., Шабалкина С.В., Пересторонина О.Н. Особенности выделения высоких природоохранных ценностей типа «Редкие экосистемы и местообитания» для сертификации лесов Кировской области // Теоретическая и прикладная экология. 2021. № 2. С. 229–234.
5. Mihai G., Teodosiu M. Genetic diversity and breeding of larch (*Larix decidua* Mill.) in Romania // Annals of Forest Research. 2009. V. 52. No. 1. P. 97–108.
6. Semerikov V.L., Lascoux M. Nuclear and cytoplasmic variation within and between Eurasian *Larix* (Pinaceae) species // American Journal of Botany. 2003. V. 90. No. 8. P. 1113–1123.
7. Gryc V., Vavřík H., Horn K. Density of juvenile and mature wood of selected coniferous species // Journal of Forest Science. 2011. V. 57. No. 3. P. 123–130.
8. Vâlcău A., Holonec L., Taut I., Sestras R.E. Variability of the traits of cones and seeds in different larch clones I. The influence of the Provenance // Bulletin of University of Agricultural Sciences and Veterinary Medicine Cluj-Napoca. Horticulture. 2011. V. 68. No. 1. P. 474–480.
9. Repáč A., Tučeková I., Sarvašová J., Vencurik I. Survival and growth of outplanted seedlings of selected tree species on the High Tatra Mts. Windthrow Area after the first crowing season // Journal of Forest Science. 2011. V. 57. No. 8. P. 349–358.
10. Rossi S., Rathgeber C.B.K., Deslauriers A. Comparing needle and shoot phenology with xylem development on three conifer species in Italy // Annals of Forest Science. 2009. V. 66. No. 2. P. 206p1–206p8.

11. Clausen J., Kozlovsky T.T. Observation of growth of long shoots at *Larix laricina* // Canadian Journal of Botany. 1970. V. 48. No. 6. P. 1045–1048.

12. Ho R., Rouse G.E. Pollen germination of *Larix sibirica* (Siberian Larch) *in vitro* // Canadian Journal of Botany. 1970. V. 48. No. 2. P. 213–215.

13. Colas F., Perron M., Tousignant D., Parent C., Pelletier M., Lemay P. A novel approach for the operational production of hybrid larch seeds under Northern climatic conditions // The Forestry Chronicle. 2008. V. 84. No. 1. P. 95–104.

14. Markiewicz P. Problems with seed production of European larch in Seed Orchards in Poland // Seed Orchards: Proceedings from a Conference. Uppsala, Sweden: SLU/Publikationstjänst, 2008. P. 161–164.

15. Улитин М.М., Бессчетнов В.П. Сравнительная оценка **таксационных показателей лесных культур** лиственницы сибирской (*Larix sibirica*) при интродукции в Нижегородской области // Известия вузов. Лесной журнал 2020. № 6. С. 33–41.

16. Пуряев А.С., Зарипов И.Н. Производительность древостоев лиственницы сибирской в условиях Республики Татарстан // Известия Санкт-Петербургской лесотехнической академии. 2018. Вып. 224. С. 136–149.

17. Прохорова Е.В., Новиков П.С. Результаты селекционной оценки лесных культур лиственницы в Республике Мордовия // Научный журнал КубГАУ. 2013. № 90 (06). С. 500–510 [Электронный ресурс] <http://ej.kubagro.ru/2013/06/pdf/55/pdf> (Дата обращения: 30.01.2023).

18. Карасёва Т.А. Изучение вопроса введения лиственницы сибирской в искусственные насаждения лесов Алтайского края // Вестник Алтайского государственного аграрного университета. 2016. № 9 (143). С. 75–79.

19. Мельник П.Г., Карасёв Н.Н. Результаты интродукции лиственницы в северо-восточное Подмосковье // Вестник Московского государственного университета леса – Лесной вестник. 2005. № 2. С. 36–40.

20. Пилипко Е.Н. Методология исследований лесных экосистем: Методическое пособие. Вологда-Молочное: ИЦ ВГМХФ, 2013. 113 с.

21. Швиденко А.З., Щепаченко Д.Г., Нильссон С., Булуй Ю.И. Таблицы и модели хода роста и продуктивности насаждений основных лесообразующих пород Северной Евразии (нормативно-справочные материалы). М.: Федеральное агентство лесного хозяйства, 2008. 886 с.

22. Орлов М.М. Лесная таксация. Л.: Техиздат, 1925. 532 с.

23. Ипатов В.С., Мирин Д.М. Описание фитоценоза: Методические рекомендации. СПб.: СПбГУ, 2008. 71 с.

24. Смирнов В.Э., Ханина Л.Г., Бобровский М.В. Обоснование системы эколого-ценотических групп видов растений лесной зоны европейской России на основе экологических шкал, геоботанических описаний

и статистического анализа // Бюллетень МОИП, отдел биологический. 2006. Т. 111. Вып. 2. С. 36–47.

25. Смирнова О.В., Ханина Л.Г., Смирнов В.Э. Эколого-ценотические группы в растительном покрове лесного пояса Восточной Европы // Восточноевропейские леса: история в голоцене и современность. Кн. 1. / Под ред. О.В. Смирновой. М.: Наука, 2004. С. 165–175.

26. Савиных Н.П., Пересторонина О.Н., Видякин А.И., Гальвас А.Г. Основы устойчивого сохранения остепнённых боров в пределах особо охраняемых природных территорий // Вестник Костромского государственного университета им. Н.А. Некрасова. 2014. Т. 20. № 7. С. 62–65.

## References

1. Karpachevskiy M.L., Teplyakov V.K., Yanitskaya T.O., Yaroshenko A.Y. Fundamentals of sustainable forest management. Moskva: Vsemirnyy fond dikoy prirody (WWF), 2009. 143 p. (in Russian).

2. Karasova M.A. Siberian larch in the Middle Volga region. Yoshkar-Ola: MarGTU, 2003. 376 p. (in Russian).

3. Amirkhanov L.I. Shine and poverty Lindulovskoy grove. Sankt-Peterburg: OOO "Izdatel'skiy tsentr "Ostrov", 2019. 80 p. (in Russian).

4. Savinykh N.P., Shabalkina S.V., Perestoronina O.N. Peculiarities of high conservation values of the "Rare ecosystems and habitats" type for forest certification in the Kirov Region // Theoretical and Applied Ecology. 2021. No. 2. P. 229–234 (in Russian). doi: 10.25750/1995-4301-2021-2-229-234

5. Mihai G., Teodosiu M. Genetic diversity and breeding of larch (*Larix decidua* Mill.) in Romania // Annals of Forest Research. 2009. V. 52. No. 1. P. 97–108.

6. Semerikov V.L., Lascoux M. Nuclear and cytoplasmic variation within and between Eurasian *Larix* (Pinaceae) species // American Journal of Botany. 2003. V. 90. No. 8. P. 1113–1123. doi: 10.3732/ajb.90.8.1113

7. Gryc V., Vavrčík H., Horn K. Density of juvenile and mature wood of selected coniferous species // Journal of Forest Science. 2011. V. 57. No. 3. P. 123–130. doi: 10.17224/18/2010-JFS

8. Vâlcău A., Holonec L., Taut I., Sestras R.E. Variability of the traits of cones and seeds in different larch clones I. The influence of the Provenance // Bulletin of University of Agricultural Sciences and Veterinary Medicine Cluj-Napoca. Horticulture. 2011. V. 68. No. 1. P. 474–480. doi: 10.15835/buasvmcn-hort:7018

9. Repáč A., Tučeková I., Sarvašová J., Vencurik I. Survival and growth of outplanted seedlings of selected tree species on the High Tatra Mts. Windthrow Area after the first crowing season // Journal of Forest Science. 2011. V. 57. No. 8. P. 349–358. doi: 10.17224/130/2010-JFS

10. Rossi S., Rathgeber C.B.K., Deslauriers A. Comparing needle and shoot phenology with xylem development on three conifer species in Italy // Annals of Forest

- Science. 2009. V. 66. No. 2. P. 206p1–206p8. doi: 10.1051/forest/2008088
11. Clausen J., Kozlovsky T.T. Observation of growth of long shoots at *Larix laricina* // Canadian Journal of Botany. 1970. V. 48. No. 6. P. 1045–1048. doi: 10.1139/b70-150
12. Ho R., Rouse G.E. Pollen germination of *Larix sibirica* (Siberian Larch) *in vitro* // Canadian Journal of Botany. 1970. V. 48. No. 2. P. 213–215. doi: 10.1139/b70-032
13. Colas F., Perron M., Tousignant D., Parent C., Pelletier M., Lemay P. A novel approach for the operational production of hybrid larch seeds under Northern climatic conditions // The Forestry Chronicle. 2008. V. 84. No. 1. P. 95–104. doi: 10.5558/tfc84095-1
14. Markiewicz P. Problems with seed production of European larch in Seed Orchards in Poland // Seed Orchards: Proceedings from a Conference. Uppsala, Sweden: SLU/Publikationstjänst, 2008. P. 161–164.
15. Ulitin M.M., Besschetnov V.P. Comparative assessment of taxation indicators of forest plantations of Siberian larch (*Larix sibirica*) during introduction in the Nizhny Novgorod region // Izvestiya vuzov. Lesnoy zhurnal. 2020. No. 6. P. 33–41 (in Russian). doi: 10.37482/0536-1036-2020-6-33-41
16. Puryayev A.S., Zaripov I.N. Productivity of forest stands of Siberian larch in the conditions of the Republic of Tatarstan // Izvestiya Sankt-Peterburgskoy lesotekhnicheskoy akademii. 2018. V. 224. P. 136–149 (in Russian).
17. Prokhorova Ye.V., Novikov P.S. Results of the selection evaluation of larch forest cultures in the Republic of Mordovia // Nauchnyy zhurnal KubGAU. 2013. No. 90 (06). P. 500–510 [Internet resource] <http://ej.kubagro.ru/2013/06/pdf/55/pdf> (Accessed: 30.01.2023) (in Russian).
18. Karasova T.A. Studying the issue of introducing Siberian larch into artificial forest plantations of the Altai Territory // Vestnik Altayskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta. 2016. No. 9 (143). P. 75–79 (in Russian).
19. Mel'nik P.G., Karasov N.N. Results of the introduction of larch into the north-eastern suburbs of Moscow // Vestnik Moskovskogo gosudarstvennogo universiteta lesa – Lesnoy vestnik. 2005. No. 2. P. 36–40 (in Russian).
20. Pilipko Ye.N. Forest ecosystem research methodology: Methodological guide. Vologda-Molochnoye: ITS VGMKHF, 2013. 113 p. (in Russian).
21. Shvidenko A.Z., Shchepachenko D.G., Nil'sson S., Buluy Yu.I. Tables and models of the course of growth and productivity of plantations of the main forest-forming species of Northern Eurasia (regulatory reference materials). Moskva: Federalnoe agentstvo lesnogo khozyaystva, 2008. 886 p. (in Russian).
22. Orlov M.M. Forest inventory. Leningrad: Tekhizdat, 1925. 532 p. (in Russian).
23. Ipatov V.S., Mirin D.M. Description of phytocenosis: Guidelines. Sankt-Peterburg: SPbGU, 2008. 71 p. (in Russian).
24. Smirnov V.E., Khanina L.G., Bobrovskiy M.V. Substantiation of the system of ecological-cenotic groups of plant species in the forest zone of European Russia on the basis of ecological scales, geobotanical descriptions and statistical analysis // Byulleten' MOIP, otdel biologicheskij. 2006. V. 111. No. 2. P. 36–47 (in Russian).
25. Smirnova O.V., Khanina L.G., Smirnov V.E. Ecological and coenotic groups in the vegetation cover of the forest belt of Eastern Europe // Vostochnoyevropeyskiye lesa: istoriya v goltsene i sovremennost. Kn. 1. / Ed. O.V. Smirnova. Moskva: Nauka, 2004. P. 165–175 (in Russian).
26. Savinykh N.P., Perestoronina O.N., Vidyakin A.I., Gal'vas A.G. Fundamentals of sustainable conservation of steppe forests within specially protected natural areas // Vestnik Kostromskogo gosudarstvennogo universiteta im. N.A. Nekrasova. 2014. V. 20. No. 7. P. 62–65 (in Russian).

## Эколого-биологические и морфологические особенности возбудителя трихинеллёза в Кировской области и оптимизация мер борьбы

© 2023. О. Б. Жданова<sup>1,2,3</sup>, д. б. н., с. н. с.,  
И. И. Окулова<sup>1,4</sup>, к. в. н., доцент,

<sup>1</sup>Кировский государственный медицинский университет,  
610000, Россия, г. Киров, ул. Карла Маркса, д. 112,

<sup>2</sup>Всероссийский научно-исследовательский институт фундаментальной и прикладной  
паразитологии животных и растений им. К. И. Скрябина,  
117218, Россия, г. Москва, ул. Большая Черемушкинская, д. 28,

<sup>3</sup>Вятский государственный агротехнологический университет,  
610000, Россия, г. Киров, Октябрьский проспект, д. 133,

<sup>4</sup>Всероссийский научно-исследовательский институт охотничьего хозяйства  
и звероводства им. проф. Б. М. Житкова (ФАНО),  
610998, Россия, г. Киров, ул. Преображенская, д. 79,  
e-mail: oliabio@yandex.ru

Трихинеллёз является одним из самых опасных гельминтозоонозов на севере Европы и Азии. Анализ различных методов профилактики в гельминтологии указывает на возрастающее внимание к борьбе с данным зоонозом как в России, так и во всём мире. Дикие животные как источник инвазии играют ведущую роль в заболевании человека трихинеллёзом. Задача данной работы заключалась в оценке основных методов диагностики и профилактики гельминтозооноза. Экспертиза мяса и мясных продуктов охоты позволяет предотвращать инфекцию человека и домашних животных. В статье рассмотрено влияние низких температур, морфологические особенности капсул личинок трихинелл и аспекты совершенствования мер борьбы с трихинеллёзом на северных территориях. Индекс и форма капсулы трихинелл у хищных различны. По всей видимости данные особенности обусловлены характером паразито-хозяйственных отношений и различиями в морфологии миосимпласмов мышечной ткани у различных животных, и являются видоспецифичными для животных-хозяев трихинелл.

Проведённые исследования подтверждают эффективность комбинации методов компрессорной трихинеллоскопии и переваривания в искусственном желудочном соке (ИЖС) при посмертной диагностике трихинеллёза диких животных. При сравнении данных методов установлено, что метод переваривания в ИЖС более чувствителен по сравнению с компрессионной трихинеллоскопией, но он менее эффективен в выявлении погибших трихинелл. Новые технологии обеззараживания тушек и остатков мышечной массы животных после мездрения шкур разработаны для пунктов заготовки пушнины, с этой целью предложены специальные холодильные камеры и растворы дезинфектантов. Трихинеллы северных территорий более устойчивы к действию низких температур, поэтому режимы обеззараживания должны быть увеличены (как температура, так и время выдержки). Так, например, если замораживание свинины проводится при температуре -15 °С, и согласно рекомендации Международной комиссии по трихинеллёзу выдерживать мясо необходимо не менее 3–4 недель, то тушки диких животных должны подвергаться промораживанию не менее 3 недель при температуре менее -20 °С.

**Ключевые слова:** зооноз, трихинеллёз, животные, продукты охоты.

## Ecological, biological and morphological features of the causative agent of trichinosis in the Kirov Region and optimization of control measures

© 2023. O. B. Zhdanova<sup>1,2,3</sup> ORCID: 0000-0003-4912-8518<sup>†</sup>

I. I. Okulova<sup>1,4</sup> ORCID: 0000-0001-9938-4769<sup>†</sup>

<sup>1</sup>Kirov State Medical University,

112, Karla Marksa St., Kirov, Russia, 610000,

<sup>2</sup>All-Russian Scientific Research Institute of Fundamental and Applied Parasitology  
of Animals and Plants named after K. I. Skryabin,  
28, Bolshaya Cheremushkinskaya St., Moscow, Russia, 117218,

<sup>3</sup>Vyatka State Agrotechnological University,  
133, Oktyabrskiy Prospekt, Kirov, Russia, 610000,

<sup>4</sup>Federal State Budgetary Russian Research Institute of Game Management  
and Fur Farming named after prof. B. M. Zhitkova,  
79, Preobrazhenskaya St., Kirov, Russia, 610998,  
e-mail: oliabio@yandex.ru

Trichinellosis is one of the most dangerous zoonosis. The analysis of different methods of prevention in helminthology indicates an increasing attention to such zoonotic diseases as trichinellosis in the World and Russia. Wild animals as a source of infection play the leading role in human infection. The task of present work is diagnostics, prevention of helminthozoonosis and improved monitoring and surveillance of the dissemination of trichinellosis. Practical application of expertise of meat and meat products from hunter's trophies allows preventing infection of human and domestic animals with dangerous zoonosis. The article considers the influence of low temperatures, and the improvement of the fight against trichinosis in the northern territories. The index and shape of the capsule of trichinella in carnivores have differences. Apparently, these features are due to the peculiarities of parasite-host relationships and differences in the morphology of muscle tissue myosimplasts in various animals, and are species-specific for the host animals of trichinella.

The conducted studies confirm the effectiveness of the combination of methods of compressor trichinoscopy and digestion in the artificial gastric juice for postmortem diagnosis of trichinosis of wild animals. When comparing these methods, it was found that the method of digestion in artificial gastric juice is more sensitive compared to compressor trichinoscopy, but it is less effective in detecting dead trichinella. New technologies for disinfection of carcasses and residual muscle mass after hides have been milled have also been developed for mechanical harvesting stations; for this, special refrigerating chambers and solutions of disinfectants have been proposed. Trichinella of the northern territories are more resistant to low temperatures, therefore, disinfection modes should be increased (both temperature and exposure time). So, for example, if pork is frozen at a temperature of -15 °C, and according to the recommendation of the International Commission on Trichinosis, it is necessary to keep the meat for at least 3–4 weeks, and carcasses of wild animals should be frozen for at least 3 weeks at a temperature of less than -20 °C.

**Keywords:** zoonosis, trichinellosis, animals, meat, hunting products.

Трихинеллёз (trichinellosis, трихиноз) – опасный гельминтоз человека и животных, вызываемый гельминтами: *Trichinella spiralis* (*spiralis*), *T. spiralis* (*nativa*) и *T. pseudospiralis*. В Российской Федерации (РФ) инвазия зарегистрирована у 56 видов млекопитающих, а также у человека, главным образом на Северном Кавказе и Арктических побережьях, что связано, в первую очередь, с особенностями национальной кухни. На севере основным путём заражения является употребление копальхена (игунака), который местное население традиционно использует в пищу. Это оригинальное блюдо готовят из мяса моржей, тюленей, китов (ненецкий, чукотский варианты) и оленей (эвенкийский вариант) путём ферментирования [1, 2]. Через несколько месяцев после извлечения туши из шкуры местное население употребляет готовый кольпахен в пищу, а, нередко, присоединяются и туристы из экзотических побуждений, что является крайне опасным, так как при дегустации копальхена человек, не привыкший питаться им с детства, получает сильнейшее отравление. Это отравление может стать смертельным, так как гнилое мясо в большом количестве содержит как трупные яды, так и часто живые личинки трихинелл, не погибающие при ферментировании. Данный продукт не употребля-

ется на территории Европейской части РФ, где основным источником заражения являются пашлыки из мяса диких животных и домашние колбасы. В центральных районах РФ заболеваемость трихинеллёзом ниже по сравнению с северными территориями, и по данным Федеральной службы по надзору в сфере защиты прав потребителей и благополучия населения, в последние годы она колеблется от 0,06 случаев до 0,23 на 100 тыс. человек [3–5]. В то же время охотничий промысел с неправильной обработкой туш убитых животных, бесконтрольное скармливание их домашним животным, продажа и употребление мясных продуктов без санитарно-ветеринарной экспертизы периодически приводят к возникновению вспышек трихинеллёза, нередко со смертельным исходом.

Большинство исследователей подтверждают наличие двух типов очагов трихинеллёза: природных и синантропных. Природные очаги среди диких животных первичны по своему происхождению, а среди домашних животных и синантропных грызунов обычно возникают и поддерживаются синантропные очаги инвазии. Эндемические очаги трихинеллёза имеются практически на всей территории РФ, не является исключением и Кировская область. Нередко занос трихинелл из природных

очагов приводит к формированию временных синантропных очагов, которые при проведении комплексных мер по борьбе с данным зоонозом можно ликвидировать достаточно быстро [1, 3, 6–8].

Учитывая вышесказанное, была предпринята попытка изучения распространения трихинеллёза в Кировской области среди диких животных и совершенствование методик обеззараживания продуктов охоты с помощью инактивации трихинелл низкими температурами. Цель работы: изучение эффективности различных способов посмертной диагностики и определение резистентности личинок изолята трихинелл Кировской области к низким температурам.

### Объекты и методы исследования

Исследование диких животных на трихинеллёз проводилось с 2016 по 2022 гг. в рамках отстрела в научных целях. Всю работу с биологическим материалом, подозрительным на заражённость личинками трихинелл, проводили в соответствии с Санитарными правилами 2.1. СП 1.3.2322-08 «Безопасность работы с микроорганизмами 3–4 групп патогенности и возбудителями паразитарных болезней». От каждого вида животных брали фрагменты мышечной ткани (100 г) и помещали в морозильные камеры при температуре  $-20 \pm 2$  °C и исследовали на наличие жизнеспособных личинок через 12, 24, 36, 48, 60, 72 и 84 ч. Всего было исследовано 14 проб от лисицы, 10 – от енотовидной собаки, 14 – от волка, 20 – от бурого медведя, 8 – от барсука и 14 – от рыси. Контроль качества обеззараживания инвазионного материала низкими температурами и определение жизнеспособности личинок возбудителя трихинеллёза в мышечной ткани диких животных после оттаивания проб мышц проводили согласно «Методике определения жизнеспособности и инвазионности личинок трихинелл» по видимым морфологическим признакам личинок возбудителя (раскручивание и отсутствие подвижности) [3, 9, 10]. Для определения жизнеспособности личинок использовали метод переваривания в искусственном желудочном соке (ИЖС). Стандартный (классический) метод переваривания мясного фарша заключается в использовании раствора ИЖС, для приготовления которого берут 10 мл концентрированной HCl на 1 л воды и медицинского или свиного пепсина в концентрации от 3 до 7%. Переваривание проводили в температурном оптимуме дей-

ствия фермента в диапазоне от 37 до 42 °C в лабораторных условиях (пассивный метод) в течение 14–16 ч [9, 10]. При наличии жизнеспособных личинок их визуализировали под малым увеличением, подсчитывая подвижность (процент живых личинок), отмечали их форму, а погибшие личинки разрушались или были в расплавленном состоянии. Особое внимание уделяли наличию личинок, не погибших под действием низких температур, такие личинки трихинелл, полученные после обезвреживания мышечной массы низкими температурами и переваривания в ИЖС были свёрнуты в спираль и обладали подвижностью.

При отборе проб от диких животных для компрессионной трихинеллоскопии (КТ) учитывали, что при исследовании мяса диких животных готовят большее количество срезов мышечной ткани – от 72 до 96 (от домашних животных обычно исследуется 24 среза). Количество срезов определяется в зависимости от эпизоотической и эпидемиологической ситуации территории в соответствии с методическими указаниями «Профилактика гельминтозов, передающихся через мясо и мясные продукты», включенными в СанПиН 3.2.3215-14 «Профилактика паразитарных болезней на территории Российской Федерации» (с изменениями от 29 декабря 2015 г.). Из кусочков мышц изогнутыми ножницами по ходу мышечных волокон изготавливали 72 среза величиной с овсяное зерно, которые помещали в середину клеточки компрессориума, накрывали вторым стеклом и закрепляли винты, раздавливая срезы так, чтобы они стали прозрачными и удобными для их качественного просмотра под малым и большим увеличением. Сначала срезы исследовали под малым увеличением ( $\times 80$ ). При просмотре срезов обнаруживали капсулы с личинками трихинелл, которые имели лимоновидную, овальную или округлую формы (в зависимости от вида животного), внутри капсул расположены спирально свёрнутые личинки.

При нахождении капсул трихинелл срезы помещали под увеличение  $\times 100$  микроскопа с программным обеспечением и осуществляли промеры. Проводили измерения большого (D1) и малого диаметра (d2) капсул и рассчитывали индекс капсулы (ИК) по соотношению  $d2 : D1$ . Морфометрию проводили на микроскопе MEIJI (Япония) с программным обеспечением анализа в медицине и биологии Vision Bio (EPI). Статистическую обработку полученных данных осуществляли

в программе BIOSTAT, для обработки данных использовали пакеты программ MS Excel и Statgraphics.

**Результаты и обсуждение**

Исследованы облигатные хозяева гельминта в Кировской области – представители отряда млекопитающих: хищные (Carnivora), особое внимание уделялось семейству псовых (Canidae), кошачьих (Felidae), куньих (Mustelidae) и медвежьих (Ursidae). При исследовании диких животных установлена наивысшая экстенсивность и интенсивность инвазии среди енотовидных собак и лисиц (90% заражённость), что вполне согласуется с аналогичными данными из Центрального района РФ [11]. С целью определения чувствительности изолятов трихинелл в Кировской области к низким температурам были изучены параметры промораживания проб мышц различных животных в сравнении с арктическими изолятами и изолятами от лабораторных вариантов, полученных от животных Центрального района РФ (табл. 1).

В Кировской области особенностью трихинелл является их относительная устойчивость к низким температурам по сравнению с изолятами из центральных районов РФ. Анализ экспериментальных данных по изучению резистентности личинок трихинелл изолятов Кировской области к воздействию низких температур в диапазоне от -12 до -14 °C показал, что трихинеллы сохраняли жизнеспособность до 3 месяцев. В то же время известно, что трихинеллы арктического изолята сохраняют жизнеспособность и инвазивные свойства в этих условиях на протяжении 4 лет 3 мес. [2, 4, 6]. При температуре от 4 до 6 °C личинки трихинелл большинства изолятов сохраняют жизнеспособность в течение 9 мес.

Особенностью действия высоко отрицательной температуры является то, что проис-

ходит повреждение кристаллами льда клеточных мембран кутикулы личинок гельминта, деструкция внутренних органов и систем паразита, резко нарушаются метаболические процессы. После воздействия отрицательной температуры личинки трихинелл становятся нежизнеспособными [2, 3, 8]. Установлено, что время экспозиции обеззараживания при низкой температуре (-20 °C) незначительно различается у вариантов различных видов животных, что, с одной стороны, может быть обусловлено особенностями паразита, а с другой – особенностями строения мышечного волокна и наличия межмышечных жировых прослоек (медведь, барсук). В то же время при температуре, меньшей чем -20 °C, наблюдали гибель всех личинок изолята трихинелл Кировской области в течение нескольких суток (табл. 1), что является значительным отличием от арктических изолятов, изученных в работах [1, 2]. При проведении биопроб на сирийских хомяках авторы установили, что в мышечной ткани песка, не подвергавшейся процессу ферментации, личинки трихинелл арктических изолятов при низкой температуре (-20 °C) сохраняют не только жизнеспособность, но и инвазивность в течение нескольких месяцев, что подтверждено поставленными пробами [1, 2]. Однако при пассировании данных изолятов на лабораторных животных наблюдалось снижение устойчивости к вышеуказанным температурным режимам. Хотя в тушке морской свинки, хранившейся при -12 °C, жизнеспособность пассированных личинок трихинелл констатировали на протяжении 15 месяцев, а при температуре от 4 до 6 °C личинки сохраняли жизнеспособность 7–8 месяцев. Таким образом, показатели устойчивости личинок тестируемых арктических изолятов и адаптационные характеристики изолятов, полученных в Кировской области и Республике Коми, соответствуют температурному диапазону выживаемости для северных изо-

**Таблица 1 / Table 1**

Время обезвреживания 100 грамм мышц диких хищников при полной гибели личинок трихинелл при замораживании при -20±2 °C / Time of disinfection of 100 grams of muscles of wild predators with complete death of trichinella larvae after frozen at -20±2 °C

Вид животного / Kinds of animals	Время экспозиции, ч / Exposure time, h
Лисица / Fox	48
Енотовидная собака / Raccoon dog	60
Волк / Wolf	48
Бурый медведь / Brown bear	72
Барсук / Badger	72
Рысь / Lynx	24

Таблица 2 / Table 2

Морфологические особенности капсул трихинелл у разных видов плотоядных  
Morphological features of capsules of trichinella in different carnivorous species

Виды животных Kinds of animals	Форма капсул Capsule shape	Индекс капсулы Capsule index
Лисица Fox	лимоновидная lemon-shaped	0,33–0,75* (0,52±0,06)**
Енотовидная собака Raccoon dog	округлая rounded	0,88–0,98* (0,93±0,01)**
Волк Wolf	овальная oval	0,70–0,76* (0,73±0,03)**
Бурый медведь Brown bear	овальная oval	0,69–0,78* (0,73±0,04)**
Барсук Badger	лимоновидная, овальная lemon-shaped, oval	0,66–0,71* (0,69±0,03)**
Рысь Lynx	овальная oval	0,7–0,78* (0,74±0,06)**

Примечание: \* – диапазон индекса капсулы в пробах мышц у различных видов животных; \*\* – доверительный интервал индекса капсулы по видам животных,  $P \geq 0,95$ .

Note: \* range of capsule index in muscles in various animals, \*\* – confidence interval for the capsule index of different animals,  $P \geq 0.95$ .

лятов трихинелл, однако изоляты Кировской области значительно уступают в устойчивости к действию низких температур арктическим изолятам [1, 2, 7, 8].

Возбудители подвидов *Trichinella spiralis* (*spiralis*) и *T. spiralis* (*britovi*) выдерживают отрицательные температуры наравне с возбудителем *T. spiralis* (*nativa*) в течение нескольких месяцев [7]. Тем не менее изолят трихинелл Кировской области занимает промежуточное положение между устойчивыми и чувствительными к низким температурам видам и подвидам трихинелл, что нужно учитывать при проведении профилактических мероприятий [3–5, 7, 8]. В то же время, по данным О.Н. Андреевнa, при снижении температуры до  $-70^{\circ}\text{C}$  гибель личинок всех изолятов наступает в течение нескольких часов [3, 10, 11].

Помимо различий в устойчивости к низким температурам, при исследовании проб от заражённых животных в КТ определяли различия как самих личинок, так и их капсул. Интересно, что, как правило, находили целые капсулы даже в пробах с погибшими личинками. Форма и индекс капсулы личинок трихинелл при данных исследованиях при световой микроскопии (увеличение  $\times 100$ ) не отличались от остальных личинок. При исследовании методом КТ выявлены морфологические отличия капсул у всех видов барсуков (*Meles meles*, *M. leucurus*) и медведей (*Ursus arctos*). Капсулы трихинелл у барсука лимоновидной, реже овальной формы, в то время как у медведя преобладающее большинство

капсул овальные, значительные морфологические отличия капсул наблюдаются также у псовых и кошачьих. Морфологические особенности капсул трихинелл приведены в таблице 2.

Индекс и форма капсулы трихинелл у хищных животных различны (табл. 2). По всей видимости, данные особенности обусловлены характером отношений паразит-хозяин и различиями в морфологии миосимпластов мышечной ткани у различных животных, и являются видоспецифичными для животных-хозяев трихинелл.

Проведённые исследования подтверждают эффективность комбинации методов компрессорной трихинеллоскопии и переваривания в ИЖС при посмертной диагностике трихинеллёза диких животных. При сравнении данных методов установлено, что метод переваривания в ИЖС более чувствителен по сравнению с КТ, но он менее эффективен в выявлении погибших трихинелл. Особенно важно комбинированное исследование на трихинеллёз для северных регионов, так как использование обеих методик позволяет получить цельную картину по эпизоотологии трихинеллёза (включая такие показатели, как экстенсивность и интенсивность инвазии и температурный диапазон сохранения жизнеспособности трихинелл). Среди инвазированных данным гельминтом животных в Кировской области преобладают лисицы и енотовидные собаки, как и на Европейской части РФ. Интенсивность инвазии (ИИ) у лисиц была более 30 ли-



чинок на 1 г, что позволяет считать данных животных основным маркером эпизоотического процесса, однако и у части барсуков также установили ИИ более 30 личинок на 1 г [11]. Лисицы, енотовидные собаки и барсуки мигрируют вдоль рек, в поисках пищи приходят на свалки, дачные участки, нередко заходят в населённые пункты. Причём каждое новое поколение животных становится всё менее пугливым, что следует учитывать при планировании профилактических мероприятий. Несмотря на то, что в настоящее время активно изучается возможность вакцинации диких животных против бешенства, также возможно разрабатывать профилактические вакцины против ряда опасных паразитозов, в том числе против трихинеллёза [12–16]. Кроме того, огромное значение приобретает разработка скрининговых технологий и диагностических тест-систем для прижизненной диагностики трихинеллёза [17–21].

### Заключение

Для оптимизации мероприятий по борьбе с трихинеллёзом необходимо рекомендовать проведение регулярного мониторинга данного зооноза. Исследованиям на трихинеллёз в первую очередь должны подвергаться лисицы и енотовидные собаки. Помимо посмертной диагностики методами КТ и переваривания в ИЖС можно использовать методы прижизненной диагностики (иммуоферментный анализ, dot-ELISA, сэндвич-метод и др.). Важным аспектом является соблюдение рекомендаций по экспертизе туш различных видов диких животных, у которых отмечены различия в морфологии капсул и распределении личинок. Ветеринарно-санитарный осмотр мяса диких животных, если отстрел их осуществляется заготовительными организациями, проводится Госветслужбой на месте заготовок или в ветеринарных лабораториях. При подтверждении диагноза трихинеллёза необходимо проводить обеззараживание тушек инвазированных животных или оставшихся частей мышц после мездрения шкур, особое внимание следует уделять ветеринарно-санитарной экспертизе животных, мясо или жир которых употребляется в пищу человеком. В настоящее время имеются новые технологии обеззараживания тушек и остатков мышечной массы, а также предложены специальные холодильные камеры для пунктов заготовки пушнины [3] и разработаны химические методы, использующие различные растворы дезинфектантов [7, 8,

22]. Согласно регламенту СанПиН 3.2.3215-14 и постановлению Главного государственного санитарного врача РФ от 28 января 2021 г. № 4 весь трупный материал с трихинеллёзной инвазией рекомендуется уничтожать путём сжигания в трупосжигательных печах – крематорах. Однако наиболее экологичным методом, на наш взгляд, является промораживание: отсутствует риск возникновения лесных пожаров, предупреждается попадание в окружающую среду токсичных продуктов горения и т. д. [3, 5]. Согласно рекомендации Международной комиссии по трихинеллёзу для инактивации личинок трихинелл *T. spiralis* в свинине минимальное время замораживания при температуре -17,8 °С составляет 106 ч, при -23,3 °С – 63 ч, а при -28,9 °С – 35 ч при условии достижения этой температуры в центре куска мяса. Трихинеллы северных территорий более устойчивы к действию низких температур, поэтому режимы обеззараживания должны быть увеличены (как температура, так и время выдержки) [1–3, 23, 24]. Особенно это касается тушек диких животных. Так, например, если замораживание свинины проводится при температуре -15 °С и согласно рекомендации Международной комиссии по трихинеллёзу выдерживать мясо необходимо не менее 3–4 недель, то тушки диких животных должны подвергаться промораживанию не менее 3 недель при температуре менее -20 °С.

*Исследование выполнено в рамках университетского гранта КГМУ 1-1.6/2021.*

### Литература

1. Букина Л.А., Альгина С.Г. Изучение влияния процесса высушивания (вяление) на сохранение инвазионных свойств личинками трихинелл в традиционных продуктах питания коренного народа Чукотки // Современные научные тенденции в животноводстве, охотоведении и экологии: сб. Междунар. науч.-практ. конф. Киров: ВГСХА, 2013. С. 33–35.
2. Букина Л.А., Одоевская И.М., Успенский А.В. Методические положения по профилактике трихинеллёза на территории Чукотского полуострова // Российский паразитологический журнал. 2014. № 3. С. 137–143.
3. Андреев О.Н. Сравнительная морфология капсул личинок трихинелл от разных видов хозяев // Актуальные вопросы ветеринарной биологии. 2014. № 2 (22). С. 27–29.
4. Жданова О.Б., Ашихмин С.П., Окулова И.И., Бельтюкова З.Н. Распространённость *T. spiralis* и некоторые особенности профилактики трихинеллёза

в Кировской области // Здоровье населения и среда обитания: ЗНиСО. 2017. № 1 (286). С. 46–49.

5. Сеитгамзина Д.М., Байкадамова Г.А. Совершенствование методов диагностики при трихинеллёзе // Актуальные научные исследования в современном мире. 2021. № 11–2 (79). С. 14–19.

6. Жданова О.Б., Распутин П.Г., Масленникова О.В. Трихинеллёз плотоядных и биобезопасность окружающей среды // Экология человека. 2008. № 1. С. 9–11.

7. Ашихмин С.П., Жданова О.Б., Мартусевич А.К., Написанова Л.А., Ключкина Е.С. Некоторые кристаллоскопические свойства дезинфектантов и перспективы применения кристаллоскопической оценки в дезинфекции и дезинвазии // Российский паразитологический журнал. 2013. № 2. С. 88–96.

8. Жданова О.Б., Калужских Т.И., Ашихмин С.П., Масленникова О.В., Распутин П.Г., Мутошвили Л.Р. Гельминтозы собак Кировской области и биобезопасность окружающей среды // Теоретическая и прикладная экология. 2008. № 3. С. 49–53.

9. Гребенкина Л.А. Усовершенствование метода пентолиза с целью повышения эффективности трихинеллоскопического контроля // Российский паразитологический журнал. 2008. № 4. С. 57–59.

10. Успенский А.В. Метод ветеринарно-санитарной экспертизы мяса промысловых животных при паразитарных зоонозах // Российский паразитологический журнал. 2014. № 3. С. 151–157.

11. Андреев О.Н. Лисица обыкновенная – как основной носитель возбудителя трихинеллёза в Рязанской области // Российский ветеринарный журнал. 2012. № 4. С. 20–22.

12. Файнфельд И.А. Вакцина для животных против трихинеллёза // Вестник Дальневосточной государственной социально-гуманитарной академии. 2009. № 2 (3). С. 25–29.

13. Feng S., Wu X., Wang X., Bai X., Shi H., Tang B., Liu X., Song Y., Boireau P., Wang F., Zhao Y., Liu M. Vaccination of mice with an antigenic serine protease-like protein elicits a protective immune response against *T. spiralis* infection // J Parasitol. 2013. V. 99. No. 3. P. 426–432.

14. Успенский А.В., Жданова О.Б., Андреев О.Н., Написанова Л.А., Малышева Н.С. Трихинеллоскопия туш домашних и диких животных // Российский паразитологический журнал. 2021. Т. 15. № 3. С. 71–75.

15. Dea-Ayuela M., Rama-Inigues S., Bolas-Fernandes F. Vaccination of mice against intestinal *T. spiralis* infections by oral administration of antigens microencapsulated in metacrylic acid copolymers // Vaccine. 2006. V. 24. No. 15. P. 2772–2780.

16. Rudneva O.V., Napisanova L.A., Zhdanova O.B., Berezhko V.K. Evaluation of the protective activity of different immunostimulatory drugs at the experimental trichinosis on white mice // International Journal of High Dilution Research. 2018. V. 17. No. 2. P. 17–18.

17. Белозеров С.Н., Жданова О.Б. Прижизненная диагностика трихинеллёза песцов с помощью иммуноферментной реакции // Ветеринария. 2000. № 2. С. 34–36.

18. Жданова О.Б., Окулова И.И., Домский И.А., Руднева О.В., Успенский А.В., Стрельникова И.С., Написанова Л.А. Некоторые рекомендации по диагностике трихинеллёза барсуков. Вопросы обеспечения безопасности заготовки барсучьего жира // Медицинская паразитология и паразитарные болезни. 2020. № 4. С. 28–33.

19. Ruitenbergh E.J., van Knapen F. Enzyme-linked immunosorbent assay (ELISA) as a diagnostic method for *Trichinella spiralis* infections in pigs // Vet. Parasitol. 1977. V. 3. No. 4. P. 317–326.

20. Сеитгамзина Д.М., Байкадамова Г.А. Совершенствование методов диагностики при трихинеллёзе // Актуальные научные исследования в современном мире. 2021. № 11–2 (79). С. 14–19.

21. Мартусевич А.К., Жданова О.Б. Особенности свободного кристаллогенеза мочи здоровых и заражённых гельминтами грызунов // Труды Всероссийского НИИ гельминтологии им. К.И. Скрябина. 2007. Т. 45. С. 153–163.

22. Ашихмин С.П., Домрачева Л.И., Жданова О.Б., Кондакова Л.В., Мутошвили Л.Р., Попов Л.Б. Экологические аспекты применения азидата натрия в качестве консерванта и дезинфектанта почв урбанизированных территорий // Российский паразитологический журнал. 2010. № 2. С. 24–29.

23. Rodrigues-Perez J. Trichinellosis in the province of Granada (Spain) // VII intern. conf. on trichinellosis. Alicante, Spain, 1988. P. 398–400.

24. Тулов А.В., Звержановский М.И., Янагида Т., Коняев С.В., Андреев О.Н., Малкина А.В., Однокурцев В.А., Бондарев А.Я., Середкин И.В., Есаулова Н.В., Накао М., Сако Я., Ито А. Видовое и генетическое разнообразие трихинелл у представителей семейства Псовых (Canidae) в России // Актуальные вопросы ветеринарной биологии. 2013. № 1 (17). С. 35–41.

## References

1. Bukina L.A., Algina S.G. Study of the influence of the drying process (drying) on the preservation of invasive properties by *Trichinella* larvae in traditional food products of the indigenous people of Chukotka // Modern scientific trends in animal husbandry, hunting and ecology: sbornik Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii. Kirov: VGSHA, 2013. P. 33–35 (in Russian).

2. Bukina L.A., Odoevskaya I.M., Uspensky A.V. Methodological provisions for the prevention of trichinosis in the Chukotka Peninsula // Russian Parasitological Journal. 2014. No. 3. P. 137–143 (in Russian).

3. Andreyanov O.N. Comparative morphology of capsules of *Trichinella* larvae from different host species // Topical issues of veterinary biology. 2014. No. 2 (22). P. 27–29 (in Russian).

4. Zhdanova O.B., Ashikhmin S.P., Okulova I.I., Belyukova Z.N. The prevalence of *T. spiralis* and some features of the prevention of trichinosis in the Kirov Region // Public health and habitat: ZNiSO. 2017. No. 1 (286). P. 46–49 (in Russian). doi: 10.35627/2219-5238/2017-286-1-46-49
5. Seitkamzina D.M., Baykadamova G.A. Improvement of diagnostic methods for trichinosis // Actual scientific research in the modern world. 2021. No. 11–2 (79). P. 14–19 (in Russian).
6. Zhdanova O.B., Rasputin P.G., Maslennikova O.V. Trichinosis of carnivores and environmental biosafety // Human Ecology. 2008. No. 1. P. 9–11 (in Russian).
7. Ashikhmin S.P., Zhdanova O.B., Martusevich A.K., Writanova L.A., Klyukina E.S. Some crystalloscopic properties of disinfectants and prospects for the use of crystalloscopic assessment in disinfection and disinvasion // Russian Parasitological Journal. 2013. No. 2. P. 88–96 (in Russian).
8. Zhdanova O.B., Kaluzhskikh T.I., Ashikhmin S.P., Maslennikova O.V., Rasputin P.G., Mutoshvili L.R. Helminthiasis of dogs of the Kirov region and environmental biosafety // Theoretical and Applied Ecology. 2008. No. 3. P. 49–53 (in Russian). doi: 10.25750/1995-4304-2008-3-049-53
9. Grebenkina L.A. Improvement of the peptolysis method in order to increase the efficiency of trichinelloscopic control // Russian Journal of Parasitology. 2008. No. 4. P. 57–59 (in Russian).
10. Uspensky A.V., Skvortsova F.A. Method of veterinary and sanitary examination of meat of game animals in case of parasitic zoonoses // Russian Parasitological Journal. 2014. No. 3. P. 151–157 (in Russian).
11. Andreyanov O.N. Red fox – as the main carrier of the causative agent of trichinosis in the Ryazan Region // Russian Veterinary Journal. 2012. No. 4. P. 20–22 (in Russian).
12. Faynfeld I.A. Vaccine for animals against trichinosis // Bulletin of the Far Eastern State Social and Humanitarian Academy. 2009. No. 2 (3). P. 25–29 (in Russian).
13. Feng S., Wu X., Wang X., Bai X., Shi H., Tang B., Liu X., Song Y., Boireau P., Wang F., Zhao Y., Liu M. Vaccinatum of mice with an antigenic serine protease – like protein elicits a protective immune response against *T. spiralis* infection // J Parasitol. 2013. V. 99. No. 3. P. 426–432. doi: 10.1645/12-46.1
14. Uspensky A.V., Zhdanova O.B., Andreyanov O.N., Pisanova L.A., Malysheva N.S. Trichinelloscopy of carcasses of domestic and wild animals // Russian Parasitological Journal. 2021. V. 15. No. 3. P. 71–75 (in Russian). doi: 10.31016/1998-8435-2021-15-3-71-75
15. Dea-Ayuela M., Rama-Inigues S., Bolas-Fernandes F. Vaccinatum of mice against intestinal *T. spiralis* infections by oral administration of antigens microencapsulated in metacrylic acid copolymers // Vaccine. 2006. V. 24. No. 15. P. 2772–2780. doi: 10.1016/j.vaccine.2006.01.006
16. Rudneva O.V., Napisanova L.A., Zhdanova O.B., Berezhko V.K. Evaluation of the protective activity of different immunostimulatory drugs at the experimental trichinosis on white mice // International Journal of High Dilution Research. 2018. V. 17. No. 2. P. 17–18.
17. Belozherov S.N., Zhdanova O.B. Lifetime diagnosis of Arctic fox trichinosis using enzyme immunoassay // Veterinary Medicine. 2000. No. 2. P. 34–36 (in Russian).
18. Zhdanova O.B., Okulova I.I., Domsy I.A., Rudneva O.V., Uspensky A.V., Strelnikova I.S., Pisanova L.A. Some recommendations for the diagnosis of trichinosis of badgers. Issues of ensuring the safety of harvesting badger fat // Medical Parasitology and Parasitic Diseases. 2020. No. 4. P. 28–33 (in Russian). doi: 10.33092/0025-8326mp2020.4.28-33
19. Ruitenbergh E.J., van Knapen F. Enzyme-linked immunosorbent assay (ELISA) as a diagnostic method for *Trichinella spiralis* infections in pigs // Vet. parasitol. 1977. V. 3. No. 4. P. 317–326. doi: 10.1016/0304-4017(77)90018-8
20. Seitkamzina D.M., Baykadamova G.A. Improvement of diagnostic methods for trichinosis // Actual scientific research in the modern world. 2021. No. 11-2 (79). P. 14–19 (in Russian).
21. Martusevich A.K., Zhdanova O.B. Features of free crystallogenesis of urine of healthy and infected with helminths rodents // Trudy Vserossiyskogo NII gelmintologii im. K.I. Skryabina. 2007. V. 45. P. 153–163 (in Russian).
22. Ashikhmin S.P., Domracheva L.I., Zhdanova O.B., Kondakova L.V., Mutoshvili L.R., Popov L.B. Environmental aspects of the use of sodium azide as a preservative and disinfectant of soils in urbanized areas // Russian Parasitological Journal. 2010. No. 2. P. 24–29 (in Russian).
23. Rodrigues-Perez J. Trichinellosis in the province of Granada (Spain) // VII intern. conf. on trichinellosis. Alicante, Spain, 1988. P. 398–400.
24. Tulov A.V., Zverzhanovsky M.I., Yanagida T., Konyaev S.V., Andreyanov O.N., Malkina A.V., Odnokurtsev V.A., Bondarev A.Ya., Seredkin I.V.V., Esaulova N.V., Nakao M., Sako Ya., Ito A. Species and genetic diversity of *Trichinella* in representatives of the Canidae family in Russia // Actual Problems of Veterinary Biology. 2013. No. 1 (17). P. 35–41 (in Russian).

## Состояние ценопопуляций бобовых (Fabaceae) на степных пастбищах Республики Алтай

© 2023. Н. А. Карнаухова<sup>1</sup>, к. б. н., доцент, с. н. с.,  
Г. К. Зверева<sup>2,3</sup>, д. б. н., профессор, г. н. с.,

<sup>1</sup>Центральный сибирский ботанический сад СО РАН,  
630090, Россия, г. Новосибирск, ул. Золотогорная, д. 101,

<sup>2</sup>Новосибирский государственный педагогический университет,  
630126, Россия, г. Новосибирск, ул. Вилюйская, д. 28,

<sup>3</sup>Сибирский федеральный научный центр агробιοтехнологий РАН,  
630501, Россия, г. Краснообск, ул. Центральная, д. 2б,  
e-mail: karnaukhova-nina@rambler.ru, labsp@ngs.ru

Изучалось влияние выпаса сельскохозяйственных животных на виды семейства Fabaceae в степных сообществах Республики Алтай. Установлено, что на степных пастбищах среднегорий наблюдается широкое проявление признаков пастбищной дигрессии, свидетельствующих в основном о наличии интенсивного выпаса сельскохозяйственных животных. Участие бобовых растений в живой надземной фитомассе в формирующихся переходных сообществах колеблется от 25–50% в луговых степях до 5–28% в настоящих степях и до 11–17% в опустыненных ценозах, что во многом определяется особенностями их адаптации к пастбищной нагрузке и к природно-климатическим факторам. Под влиянием интенсивного выпаса на степных пастбищах Республики Алтай у большинства видов бобовых наблюдается ускоренное старение и уменьшение величины продуктивности надземной массы. Усиленный выпас отрицательно влияет как на морфометрические показатели всех изученных видов, так и на онтогенетическую структуру их ценопопуляций. Степень устойчивости к антропогенному воздействию каждого вида во многом определяется принадлежностью к той или иной жизненной форме и её лабильностью. Наименее устойчивыми к выпасу и скашиванию оказались длиннопобеговые каудексовые многолетники, которые встречаются только на начальных стадиях угнетения травостоя, так как при регулярном отчуждении побегов не образуют семена и быстро выпадают из травостоя (*Onobrychis arenaria*, *Astragalus austriacus*). Корнеотпрысковые (*Medicago falcata*) и корневищные (*Astragalus tibetanus*) виды могут удерживаться в сообществах при отсутствии семенного возобновления. Полурозеточные (*Astragalus austrosibiricus*, *Hedysarum gmelinii*) и розеточные (*Astragalus laguroides*, *A. testiculatus*, *A. dilutus*, *Gueldenstaedtia monophylla*, *Oxytropis pumila*) каудексовые стержнекорневые многолетники способны к восстановлению ценопопуляций после прекращения пастбищной нагрузки за счёт почек возобновления, сохраняющихся на многолетних частях каудекса.

**Ключевые слова:** Fabaceae, пастбищная дигрессия, надземная фитомасса, ценопопуляции.

## Status of coenopopulations of legumes (Fabaceae) on steppe pastures of the Altai Republic

© 2023. N. A. Karnaukhova<sup>1</sup> ORCID: 0000-0001-8769-3142,  
G. K. Zvereva<sup>2,3</sup> ORCID: 0000-0001-6282-8688

<sup>1</sup>Central Siberian Botanical Garden SB RAS,  
101, Zolotodolinskaya St., Novosibirsk, Russia, 630090,

<sup>2</sup>Novosibirsk State Pedagogical University,  
28, Viluiskaya St., Novosibirsk, Russia, 630126,

<sup>3</sup>Siberian Federal Scientific Center of Agrobiotechnologies of the RAS,  
2b, Tsentralnaya St., Krasnoobsk, Russia, 630501,  
e-mail: karnaukhova-nina@rambler.ru, labsp@ngs.ru

The influence of grazing on the species of the Fabaceae family in the steppe communities of the Altai Republic was studied. It was found that on the steppe pastures of the middle mountains, there is a wide manifestation of signs of pasture digression, which mainly indicate the presence of intensive grazing of farm animals. The participation of leguminous plants in living aboveground phytomass in emerging transitional communities ranges from 25–50% in meadow steppes to 5–28% in real ones and up to 11–17% in desertified cenoses, which is largely determined by the peculiarities of their

adaptation to pasture load and to natural and climatic factors. Under the influence of intensive grazing on the steppe pastures of the Altai Republic, accelerated aging and a decrease in the productivity of the aboveground mass are observed in most legume species. Enhanced grazing negatively affects both the morphometric parameters of all studied species and the ontogenetic structure of their coenopopulations. The degree of resistance to anthropogenic impact of each species is largely determined by its belonging to a particular life form and its lability. The least resistant to grazing and mowing were long-shoot caudex perennials, which are found only in the initial stages of herbage suppression, since with regular alienation of shoots they do not form seeds and quickly fall out of the herbage. Rhizomatous (*Medicago falcata*, *Astragalus tibetanus*) species can be kept in communities in the absence of seed renewal. Semi-rosette (*Astragalus austrosibiricus*, *Hedysarum gmelinii*) and rosette (*Astragalus laguroides*, *A. testiculatus*, *A. dilutus*, *Gueldenstaedtia monophylla*, *Oxytropis pumila*) tap-rooted perennials are capable of restoring cenopopulations after cessation of pasture load due to renewal buds remaining on perennial parts of the caudex. When growing conditions change (temporary cessation or reduction of pasture load, good moisture), adaptive reactions are activated aimed at the rapid growth of shoots after the removal of the negative factor.

**Keywords:** Fabaceae, pasture digression, aboveground phytomass, coenopopulations.

Современные процессы деградации и опустынивания степных экосистем свидетельствуют о значительном влиянии выпаса скота на растительный покров [1, 2]. Растительность степных сообществ Горного Алтая интенсивно используется под выпас сельскохозяйственных животных, при этом пастбищная нагрузка за последние годы увеличилась в связи с возросшим поголовьем [3]. Известно, что бессистемный выпас приводит к развитию пастбищной дигрессии, при которой наблюдается уменьшение проективного покрытия и высоты травостоя, угнетение и выпадение ценных кормовых растений, а также снижение запасов фитомассы. В результате формируются малопродуктивные вторичные ценозы, что показано для степной растительности как отечественными [4–7], так и зарубежными исследователями [8–14].

Изменения, происходящие в растительных сообществах под влиянием природно-климатических и антропогенных факторов, отражаются на структуре фитомассы и зависят от доли участия видов различных ботанических групп в травостое [15]. Виды семейства Fabaceae, произрастающие в Республике Алтай, обитают в широком диапазоне местообитаний и при различной антропогенной нагрузке [16]. Многие из них относятся к хорошим кормовым растениям. Снижение массы бобовых происходит по мере усиления дигрессии от первой стадии до третьей, например, в горных и луговых степях Северной части Центральной Монголии – в 4,1–4,7 раза [17]. Исследования устойчивости видов семейства Fabaceae к выпасу не проводились.

Для определения ответной реакции растений на неблагоприятные воздействия внешних факторов нередко используется сравнительное изучение их организменных и популяционных параметров в различных условиях произрастания [18–22].

Цель работы: изучение влияния пастбищной дигрессии на организменные и популяционные показатели бобовых в Республике Алтай.

### Объекты и методы исследования

Объектами исследований являются растения и сообщества естественных пастбищ среднегорий Республики Алтай. На пастбищах с различной стадией дигрессии в 2017–2020 гг. проводили изучение структуры ценопопуляций *Astragalus austrosibiricus* Schischkin., *A. austriacus* Jacq., *A. brevifolius* Ledeb., *A. dilutus*, *A. laguroides* Pall., *A. rytidocarpus* Ledeb., *A. testiculatus* Pall., *A. tibetanus* Benth. ex Bunge, *Gueldenstaedtia monophylla* Fischer, *Hedysarum gmelinii* Ledeb., *Medicago falcata*, *Onobrychis arenaria*, *Oxytropis pumila* Fischer ex DC и др.

Исследование состояния онтогенетической структуры ценопопуляций (ЦП) видов проведено согласно общепринятым методикам [18, 19, 23–25]. При определении пастбищной дигрессии (ПД) использованы подходы А.А. Горшковой [26]. Различали 4 стадии пастбищной дигрессии: I – естественное состояние растительности при незначительном выпасе; II – начальные стадии угнетения травостоя при постоянном выпасе; III – угнетение травостоя при усиленном выпасе; IV – сбой. Запасы надземной массы определяли укосным методом на учётных площадках размером 0,25 м<sup>2</sup> в 10-кратной повторности. Надземная фитомасса (НФМ) состоит из живой (зелёной) фитомассы (живая НФМ) и надземной мортмассы (НММ), включающей ветошь и подстилку [27].

Сбор материала осуществляли в пределах одного участка ассоциации внутри её контура в период цветения изучаемых видов. Видовой состав выявляли на площадках в 100 м<sup>2</sup>. На-

Таблица 1 / Table 1

Краткая характеристика изученных степных пастбищ Республики Алтай  
Brief description of the studied steppe pastures of the Altai Republic

№ ПД No. SPD	Сообщество Community	Координаты Coordinates	ОПП, % ППБ TPC, % PCL	ЖНФМ НМБ LAP AML
Луговая степь / Meadow steppe				
1 II	Тимьяново-злаково-бобовое <i>Thyme-cereals-legumes (Astragalus austrosibiricus, Onobrychi sarenaria, Stipa capillata, Festuca valesiaca, Thymus mongolicus)</i>	50°47'47,66"N 88°01'08,63"E	50–85 25–30	27,3 13,7
2 II–III	Гетеропаппусово-ковыльно-бобовое <i>Altai astra-feather-grass-legumes (Astragalus austrosibiricus, A. tibetanus, Medicago falcata, Stipa capillata, Heteropapus altaicus)</i>	50°14'50,13"N 87°42'42,35"E	40–85 25–30	35,6 8,9
Настоящая степь / Real steppe				
3 III	Копеечниково-лапчатково-ковыльное <i>Tick trefoil-quinquefoil-feather-grass (Stipa capillata, Potentilla acaulis, Hedysarum gmelinii)</i>	50°50'00,47"N 85°54'44,02"E	40–50 15–18	10,6 1,8
4 III–IV	Осоково-злаково-полынное <i>Sedge-cereals-sagebrush (Artemisia frigida, Stipa capillata, Agropyron kazachstanicum, Festuca ovina, Carex duriuscula)</i>	50°50'54,65"N 85°49'09,50"E	45–55 3	15,0 4,2
5 III–IV	Полынно-осоковое / Sagebrush-sedge <i>(Carex duriuscula, Artemisia frigida)</i>	50°46'41,41"N 88°13'59,22"E	25–40 0–0,1	14,3 Нет
6 II–III	Лапчатково-осоково-злаковое <i>Quinquefoil-sedge-cereals (Stipa capillata, Phleum phleoides, Festuca valesiaca, Carex duriuscula, C. korshinskyi, Potentilla acaulis)</i>	50°44'58,95"N 88°03'38,14"E	55–65 0–0,1	16,5 2,0
7 III	Мятликово-полынное / Bluegrass-sagebrush <i>(Artemisia frigida, Poa attenuata)</i>	50°12'29,76"N 88°02'17,53"E	30–40 0,1	9,6 0,7
Настоящая каменистая степь / Real rocky steppe				
8 II–III	Полынно-тонконогово-горноколосниковое <i>Sagebrush-June grass-Orostachys (Koeleria cristata, Orostachys spinosa, Carex duriuscula)</i>	50°00'43,68"N 88°43'07,70"E	50–75 1–8	9,4 0,5
9 III–IV	Ковыльно-полынно-лапчатковое <i>Feather-grass-sagebrush-quinquefoil (Potentilla acaulis, Artemisia frigida, Stipa capillata)</i>	50°24'33,59"N 86°45'24,09"E	50–60 0,5	8,0 0,5
Опустыненная каменистая степь / Deserted rocky steppe				
10 III	Житняково-галечневоковыльное <i>Agropyron-pebbly feather-grass (Stipa glareosa, Agropyron kazachstanicum)</i>	50°02'25,22"N 88°31'49,24"E	10–20 0–0,1	5,1 0,6
11 II–III	Бобово-галечневоковыльно-житняковое <i>Legumes-pebbly feather-grass-Agropyron (Agropyron kazachstanicum, Stipa glareosa, Astragalus dilutus, Oxytropis pumila, Astragalus laguroides)</i>	50°05'46,20"N 88°21'54,19"E	10–30 0–15	4,2 0,7

Примечание: ПД – стадия пастбищной дигрессии, ОПП – общее проективное покрытие, ППБ – проективное покрытие бобовых, ЖНФМ – живая надземная фитомасса, НМБ – надземная масса бобовых (ц воздушно-сухой массы/га).

Note: SPD – stage of pasture digression, TPC – total projective cover, PCL – projective cover of legumes, LAP – live aboveground phytomass, AML – aerial mass of legumes (centner of air-dry mass/ha).

звания видов высших растений даны по сводке С.К. Черепанова [28]. Биометрические показатели обработаны статистически при помощи программ Excel и Statistica.

### Результаты и обсуждение

Интенсивный выпас сельскохозяйственных животных приводит к тому, что в большинстве степных сообществ Республики Алтай выявляются черты пастбищной дигрессии, из-за чего в сообществах снижаются продуктивность и высота, а общее проективное покрытие становится неравномерным (табл. 1).

В луговых степях при умеренной пастбищной нагрузке злаки, представленные в основном *Stipa pennata* L., *S. capillata* L., *Phleum phleoides* (L.) Karsten, *Koeleria cristata* (L.) Pers., *Elytrigia gmelinii* (Trin.) Nevski и *Festuca ovina* L., составили 8–24% от живой НФМ. Доля разнотравья изменялась от 7 до 10%, при этом местами наблюдалось разрастание *Artemisia frigida* Willd., *Potentilla acaulis* L. и *Heteropappus altaicus* (Willd.) Novopokr.

Более интенсивному выпасу подвержены сообщества настоящих степей, часто они находятся на последних стадиях ПД и отличаются выраженной мозаичностью травостоя. В качестве доминантов и содоминантов переходных ценозов нередко выступают дигрессионно устойчивые виды растений, такие как *Artemisia frigida*, *A. santolinifolia* Turcz. Ex Bess., *Potentilla acaulis* и *Carex duriuscula* С.А. Мей. Злаки составляют 18–50% от живой НФМ, среди них более всего *Festuca ovina*, *F. valesiaca* Gaudin, *Koeleria cristata* и *Agropyron kazachstanicum* (Tzvelev) Peschkova, отдельными особями встречается *Stipa capillata*. Для каменистых вариантов настоящих степей при усиленном выпасе также характерно широкое присутствие *Artemisia frigida*, *Potentilla acaulis* и *Carex duriuscula*, при этом значительную долю в сообществах занимают полукустарнички (*Artemisia frigida*, *Thymus mongolicus*, *Bassia prostrata* (L.) Scott) и разнотравье (*Orostachys spinosa* (L.) С.А. Мей., *Iris humilis* Georgi и др.). Среди злаков более устойчивы и часто встречаются *Koeleria cristata*, *K. altaica* (Domin) Krylov и *Agropyron kazachstanicum*.

Наиболее низкие запасы надземной фитомассы и разреженный травостой наблюдается в опустыненных каменистых степях, которые используются для выпаса преимущественно в весенне-раннелетний период. Основу продуктивности сообществ во второй половине летнего периода составляли *Stipa glareosa*

*P.A. Smirn.*, *Agropyron kazachstanicum*, а также *Caragana pygmaea*, *Krascheninnikovia ceratoides* (L.) Gueldenst., *Bassia prostrata* и *Artemisia frigida*.

Доля бобового компонента в живой НФМ деградированных сообществ луговых степей составила 25–50% и включала преимущественно *Astragalus austrosibiricus*, *A. tibetanus*, *Onobrychis arenaria* и *Medicago falcata*. Весовое участие бобовых в ценозах настоящих степей колебалось от 7 до 28%, среди них более часто встречались *Astragalus austrosibiricus*, *A. tibetanus*, *A. testiculatus*, *Hedysarum gmelinii*, *Medicago falcata*. В структуре живой НФМ настоящих каменистых степей масса бобовых составила 5–8%, среди них рассеяно присутствовали *Caragana pygmaea*, виды рода *Astragalus*: *A. brevifolius*, *A. laguroides*, *A. austrosibiricus* и *A. testiculatus*. В сообществах опустыненных каменистых степей на фоне низкой продуктивности доля бобовых растений изменялась от 11 до 17%, более адаптированными к этим условиям оказались *Astragalus laguroides*, *A. dilutus* и *Oxytropis pumila*.

В луговых степях при слабой пастбищной нагрузке многие бобовые (*Onobrychis arenaria*, *Medicago falcata*, *Astragalus austrosibiricus*, *Hedysarum gmelinii*) имеют хорошие морфометрические показатели и накапливают значительную надземную массу (табл. 2). Наибольшие показатели отмечены у особей *A. austrosibiricus*, так как при незначительном выпасе (I стадия ПД) их каудекс слабо разбивается и разрастается до 10–20 см, из его почек может отрастать от 20 до 60 побегов. При усилении нагрузки скота все биометрические показатели астрагала уменьшаются, особенно резко для надземной части и числа побегов на особь.

На начальных стадиях ПД в луговых степях структура ЦП многих видов нормальная, полночленная (*Astragalus austrosibiricus*, *Hedysarum gmelinii*) или неполночленная (*Astragalus tibetanus*, *Onobrychis arenaria* и др.). Так, у *Medicago falcata* и *Onobrychis arenaria* она неполночленная с преобладанием генеративных растений (100–86,6%). У *M. falcata* это связано с большим количеством генеративных парциальных образований и отсутствием семенного размножения из-за скашивания растений во время цветения (табл. 3, № 2). Наличие подростка из виргинильных особей *O. arenaria* (табл. 3, № 1) свидетельствует о неравномерности семенного возобновления или отсутствии его в последние годы, которое также может быть связано с отчуждением ге-

Таблица 2 / Table 2

Продуктивность надземной массы и размеры бобовых на изученных степных пастбищах Горного Алтая (на особь, парциальный куст или побег) / The productivity of the aboveground mass and the size of legume species on the studied steppe pastures of Gornyy Altai (per individual, partial bush or shoot)

Вид, № участка, ПД Species name, plot No., SPD	НМБ, г AML, g	Высота растения, см Plant height, cm	Число побегов Number of shoots	Число листьев Number of leaves	Длина листа, см Sheet length, cm	Число соцветий Number of inflorescences
<i>Onobrychis arenaria</i> 1, II	32,5±13,9	32,4±1,3	17,3±4,3	14,9±1,2	10,3±0,4	2,4±0,3
<i>Medicago falcata</i> 2, I-II 3, III	42,7±6,9 1,5±0,2	58,6±3,5 11,1±0,9	18,9±2,8 3,8±0,4	191,6±20,9 12,7±2,3	4,5±0,4 1,6±0,1	11,0±0,5 2,2±0,3
<i>Astragalus austrosibiricus</i> I 4, II	48,6±4,4 16,1±3,2	21,6±1,1 18,1±1,2	29,4±6,8 27,6±1,3	5,7±0,4 7,1±0,4	6,9±0,6 11,3±0,5	2,0±0,1 1,7±0,3
6, II-III	9,4±3,4	19,2±0,9	24,8±5,2	4,6±0,4	8,4±0,4	1,4±0,2
5, III-IV	2,2±0,4	8,8±0,7	6,1±1,0	5,9±0,4	3,0±0,1	1,4±0,2
8, IV	1,4±0,3	6,8±0,5	1,3±0,6	5,9±0,4	3,0±0,1	1,4±0,2
<i>A. austriacus</i> III	8,0±3,2	26,6±1,2	16,0±5,5	20,5±3,1	5,1±0,6	8,2±1,9
<i>A. dilutus</i> 11, II-III	4,2±0,5	6,7±0,5	8,9±0,9	7,0±0,9	5,3±0,5	1,7±0,3
<i>A. laguroides</i> 8, II-III	1,1±0,1	5,9±0,3	4,2±0,4	7,8±0,4	3,7±0,3	7,0±1,1
11, II-III	3,7±0,4	6,7±0,7	4,1±0,4	10,6±1,0	3,1±0,2	8,9±1,0
10, III	5,0±1,2	6,7±0,8	3,4±0,6	12,2±1,3	4,2±0,4	5,4±1,2
<i>A. tibetanus</i> I-II	3,6±0,1	22,4±1,8	1,4±0,1	15,0±1,4	7,8±0,3	5,4±0,8
7, III	1,2±0,1	13,7±0,4	1,2±0,1	9,3±1,8	6,6±0,2	1,3±0,3
<i>A. testiculatus</i> III	5,0±1,2	13,7±0,4	7,8±1,4	9,3±1,8	4,2±0,2	1,3±0,3
7, III	4,1±0,3	6,0±0,4	7,2±1,3	15,8±2,7	3,9±0,1	3,8±0,7
9, IV	4,8±0,4	5,8±0,5	8,0±1,4	7,7±1,2	3,7±0,2	3,8±0,7
<i>Hedysarum gmelinii</i> II	16,0±2,7	26,0±1,2	14,0±1,6	6,5±0,5	7,2±0,7	2,3±0,2
3, III	1,2±0,1	13,7±0,7	11,0±3,6	5,8±0,9	6,7±1,2	1,5±0,1
<i>Gueldenstaedtia monophylla</i> 9, III-IV	1,3±0,2	8,2±0,4	1,0±0,0	5,6±0,4	3,8±0,2	1,0±0,0
<i>Oxytropis pumila</i> 11, II-III	3,6±0,4	6,1±0,5	2,3±0,7	15,1±5,0	5,4±0,5	5,0±0,9

Примечание: I-II – номера участков (соответствуют таблице 1), II-IV – стадии пастбищной дигрессии.  
Note: I-II – section numbers (correspond to Table 1), II-IV – stage of pasture digression.



Таблица 3 / Table 3

Онтогенетическая структура ценопопуляций некоторых видов бобовых (%)  
Ontogenetic structure of cenopopulations of some legume species (%)

Вид, № участка, ПД Species name, plot No., SPD	<i>j</i>	<i>im</i>	<i>v</i>	<i>g<sub>1</sub></i>	<i>g<sub>2</sub></i>	<i>g<sub>3</sub></i>	<i>ss</i>	<i>s</i>
<i>Onobrychis arenaria</i> 1, II	0	0	13,4	13,3	40,0	33,3	0	0
<i>Medicago falcata</i> 2, II	0	0	0	61,5	23,1	15,4	0	0
4, III–IV	0	0	1,5	4,5	7,5	40,3	29,9	16,4
<i>Astragalus austrosibiricus</i> 1, II	13,9	2,8	25,0	5,6	22,2	19,4	8,3	2,8
6, II–III	0	9,1	0	0	18,2	45,5	27,3	0
5, III–IV	8,0	4,0	4,0	0	4,0	36,0	32,0	12,0
8, II–III	0	0	35,1	2,7	2,7	8,1	35,1	16,2
<i>A. austriacus</i> 2, II	0	0	7,6	37,9	24,2	1,5	13,6	15,2
<i>A. dilutus</i> 11, II–III	0	8,7	34,8	17,4	0	30,4	8,7	0
<i>A. laguroides</i> 8, II–III	9,7	14,0	21,5	36,6	11,8	5,4	1,1	0
11, II–III	9,1	9,1	21,2	21,2	27,3	6,1	3,0	3,0
<i>A. tibetanus</i> 2, II–III	2,9	0	3,6	17,9	11,4	0,7	6,4	7,1
7, III	2,5	11,3	41,3	7,5	12,5	11,3	7,5	6,3
<i>A. testiculatus</i> 7, III	0	11,4	28,6	20,0	8,6	8,6	8,6	14,3
<i>Hedysarum gmelinii</i> II	34,8	15,7	13,5	7,9	5,6	11,2	7,9	3,4
3, III	2,5	12,7	22,8	8,9	1,3	10,1	30,4	11,4
<i>Gueldenstaedtia monophylla</i> 9, III–IV	5,0	7,5	10,0	7,5	20,0	20,0	17,5	12,5
<i>Oxytropis pumila</i> 11, II–III	0	20,0	33,3	20,0	0	20,0	6,7	0

Примечание: 1–11 – номера участков (соответствуют таблице 1); II–IV – стадии пастбищной дигрессии; *j*, *im*, *v*, *g<sub>1</sub>*, *g<sub>2</sub>*, *g<sub>3</sub>*, *ss*, *s* – онтогенетическое состояние особей.

Note: 1–11 – section numbers (correspond to Table 1), II–IV – stage of pasture digression; *j*, *im*, *v*, *g<sub>1</sub>*, *g<sub>2</sub>*, *g<sub>3</sub>*, *ss*, *s* – ontogenetic state of plant individuals.

неративной части побегов при постоянном выпасе или заготовке сена. При усилении выпаса *O. arenaria* быстро выпадает и фактически не встречается в степных сообществах со значительной пастбищной нагрузкой. *Medicago falcata* устойчивее, часто присутствует на пастбищах с III–IV стадией ПД, но значительные изменения претерпевают как морфометрические показатели, так и структура ЦП. Например, на пастбище в копеечниково-лапчатково-ковыльном сообществе настоящей степи масса надземной части, высота растений и остальные признаки значительно уменьшаются и становятся минимальными. Из-за постоянного стравливания и разбивания каудекса копытами животных растения быстро стареют и находятся в угнетённом состоянии. Об этом же свидетельствует и онтогенетическая структура ЦП *M. falcata* (табл. 3, № 4): она неполноценная, правосторонняя, с преобладанием старых особей (86,6%). Такая картина характерна для всех ЦП *Medicago falcata* степных сообществ Горного Алтая, подверженных сильной пастбищной нагрузке.

В настоящих степях при увеличении стадии ПД до III–IV у *Astragalus austrosibiricus* также, как и в предыдущем случае, особи выглядят очень угнетёнными и быстро ста-

реют. Их морфометрические характеристики достигают минимальных значений. Онтогенетическая структура ЦП *A. austrosibiricus* становится неполноценной, правосторонней. Основной пик численности этого вида в настоящих степях приходится на старые генеративные, а в каменистой степи – на особи постгенеративного периода.

На последних стадиях ПД у всех исследованных бобовых трав (*Hedysarum gmelinii*, *Astragalus tibetanus*, *A. testiculatus*, *A. brevifolius*, *A. dilutus*, *Oxytropis pumila* и др.) сохраняется тенденция к минимизации морфометрических показателей растений и изменению онтогенетической структуры ЦП в сторону выпадения некоторых стадий прегенеративного периода, быстрого старения генеративных особей и их быстрому отмиранию. Считается, что усиление партикуляции, уменьшение массы, сокращение количества и длины побегов у особей на пастбищах во многом напоминают ускоренное старение растений [29]. Нами показано, что у степных растений Тувы под влиянием интенсивного выпаса наблюдается сочетание признаков ускоренного старения и адаптивных реакций, направленных на быстрое отрастание побегов после снятия повреждающего фактора [30].

В каменистых степях у многих низкорослых розеточных каудексовых многолетников (*Astragalus laguroides*, *A. testiculatus*, *A. dilutus*, *Gueldenstaedtia monophylla*, *Oxytropis pumila* и др.) под прикрытием камней появляются дополнительные возможности для сохранения надземной части и семян, они могут успешно прорасти и развиваться в периоды достаточного увлажнения. Так, морфометрические параметры средневозрастных особей *A. laguroides* в условиях опустыненной каменистой степи выше, чем в настоящей степи. В отдельных местообитаниях произрастает редкий вид *G. monophylla*, который хорошо выдерживает пастбищную нагрузку за счёт распластанных между камней плоских широких листьев, накопления питательных веществ в утолщённой части стержневого корня и сохранения спящих почек на втянутом в почву каудексе. Например, он довольно обилен в ковыльно-полынно-лапчатковом сообществе настоящей каменистой степи (10,7 шт./м<sup>2</sup>). Пастбищная нагрузка приводит к сдвигу вправо в структуре его ЦП: старые растения генеративного и постгенеративного периодов начинают преобладать и занимают 50% от всего состава ЦП. При временном прекращении или снижении пастбищной нагрузки и достаточном количестве осадков происходит резкий рост числа молодых особей в популяции, возможностей семенного возобновления и морфометрических показателей.

### Заключение

На степных пастбищах среднегорий Республики Алтай наблюдается широкое проявление признаков ПД, свидетельствующих в основном о наличии интенсивного выпаса сельскохозяйственных животных. Участие бобового компонента в живой НФМ формирующихся переходных сообществ колеблется от 25–50% в луговых степях до 5–28% – в настоящих, и до 11–17% – в опустыненных ценозах, что во многом определяется особенностями адаптации бобовых растений к пастбищной нагрузке и к природно-климатическим факторам.

Под влиянием интенсивного выпаса на степных пастбищах Республики Алтай у большинства бобовых растений наблюдается ускоренное старение и уменьшение надземной массы. Наименее устойчивыми к выпасу и скашиванию оказались длиннопобеговые каудексовые многолетники *Onobrychis arena-ria* и *Astragalus austriacus*. Они встречаются

только на начальных стадиях угнетения травостоя, так как при регулярном отчуждении побегов не образуют семена и быстро выпадают из травостоя. *Medicago falcata* в условиях выпаса часто образует корневые отпрыски, что позволяет удерживаться в сообществах при отсутствии семенного возобновления. Длиннокорневищный *Astragalus tibetanus* также удерживается при III–IV стадиях ПД за счёт вегетативного размножения. Полурозеточные (*Astragalus austrosibiricus* и *Hedysarum gmelinii*) и розеточные (*Astragalus laguroides*, *A. testiculatus*, *A. dilutus*, *Gueldenstaedtia monophylla*, *Oxytropis pumila*) каудексовые стержнекорневые многолетники способны к восстановлению ценопопуляций после прекращения пастбищной нагрузки за счёт почек возобновления, сохраняющихся на многолетних частях каудекса. Ещё одним приспособлением к выпасу, особенно в каменистой степи, можно считать розеточную жизненную форму и минимизацию размеров у растений, позволяющую «прятаться» за камнями.

Таким образом, ПД отрицательно влияет как на морфометрические показатели бобовых трав, так и на онтогенетическую структуру их ЦП. В результате постоянного вытаптывания и объедания соцветий у них наблюдается уменьшение или прекращение семенного возобновления, которое приводит к постоянному отсутствию подроста, старению ценопопуляции и её выпадению из сообщества. При изменении условий произрастания (временное прекращение или уменьшение пастбищной нагрузки, хорошее увлажнение) включаются адаптивные реакции, направленные на быстрое отрастание побегов после снятия негативного фактора и происходит улучшение как организменных, так и популяционных показателей многих исследованных видов семейства Fabaceae.

*Работа выполнена в рамках государственных заданий ЦСБС СО РАН по проекту АААА-А21-121011290025-2, ФГБОУ ВО НГПУ № 01.980006331, Сибирского федерального научного центра агробιοтехнологий РАН № 533-2021-0008. Работа по сбору материала выполнена при частичной финансовой поддержке РФФИ и Правительства Республики Алтай № 20-44-040002 p\_a «Биологический потенциал, состояние и рациональное использование растений семейства Fabaceae на природных и сеяных кормовых угодьях Горного Алтая» № АААА-А20-120052990004-4.*

Литература

1. Кобышев И.В., Назаров А.Г. Эволюция представлений о восстановлении земель. Часть I. Древний мир // Теоретическая и прикладная экология. 2010. № 2. С. 65–71.

2. Гунин П.Д., Микляева И.М. Современные процессы деградации и опустынивания экосистем Восточно-азиатского сектора степей и лесостепей // Современные глобальные изменения природной среды. М.: Научный мир, 2006. Т. 2. С. 389–412.

3. Подкорытов А.Т. Кормление и содержание овец в условиях Горного Алтая. Ставрополь: ФГБНУ ВНИИОК, 2017. 309 с.

4. Гаджиев И.М., Королюк А.Ю., Титлянова А.А., Андриевский В.С., Баяртогтох Б. Степи Центральной Азии. Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2002. 299 с.

5. Горшкова А.А. Пастбища Забайкалья. Иркутск: Вост.-Сиб. кн. изд-во, 1973. 157 с.

6. Горчаковский П.Л., Рябинина З.Н. Степная растительность Урало-Илекского междуречья, её антропогенная деградация и проблемы охраны // Экология. 1981. № 3. С. 9–23.

7. Рыбашлыкова Л.П. Динамика растительности фитомелиорированного очага дефляции на территории Республики Калмыкия // Теоретическая и прикладная экология. 2022. № 2. С. 152–158.

8. Bestelmeyer B.T., Trujillo D.A., Tugel A.J., Havstad K.M. A multi-scale classification of vegetation dynamics in arid lands: what is the right scale for models, monitoring and restoration? // J. Arid. Env. 2006. V. 65. P. 296–318.

9. Hester A.J., Scogings P.F., Trollope W.S.W. Long-term impacts of goat browsing on bush-clump dynamics in a semi-arid subtropical savanna // Plant Ecol. 2006. V. 183. P. 277–290.

10. Hester A.J., Bergman M., Iason G.R., Moen R. Impacts of large herbivores on plant community structure and dynamics // Large herbivore ecology and ecosystem dynamics / Eds. K. Danell, R. Bergstrom, P. Duncan, J. Pastor. Cambridge: Cambridge Univ Press, 2006. P. 97–141.

11. McIntyre S., Tongway D. Grassland structure in native pastures: links to soil surface condition // Ecol Manage Restor. 2005. No. 6. P. 43–50.

12. Sonnier G., Shipley B., Navas M.-L. Quantifying relationships between traits and explicitly measured gradients of stress and disturbance in early successional plant communities // J. Veg. Sci. 2010. V. 21. No. 6. P. 1014–1024.

13. Troy S., Tsolmon R., Middleton N., Thomas D. Tracking desertification on the Mongolian steppe through NDVI and field-survey data // International Journal of Digital Earth. 2011. V. 4. No. 1. P. 50–64.

14. Ward D. Long term effects of herbivory on plant diversity and functional types in arid ecosystems // Large herbivore ecology and ecosystem dynamics / Eds. K. Danell, R. Bergstrom, P. Duncan, J. Pastor. Cambridge: Cambridge Univ Press, 2006. P. 142–169.

15. Кононова Н.А. Структура и продуктивность травянистых растительных сообществ в условиях Красноярской лесостепи // Теоретическая и прикладная экология. 2022. № 1. С. 91–96.

16. Зверева Г.К., Сыева С.Я., Карнаухова Н.А. Оценка состояния растительности на природных кормовых угодьях Горного Алтая // Вестник НГАУ (Новосибирский государственный аграрный университет). 2019. № 1(50). С. 116–125.

17. Уртнасан М., Любарский Е.Л. Пастбищная дигрессия в степях Центральной Монголии // Учёные записки Казанского университета. Т. 155. Кн. 1. Естественные науки. 2013. С. 158–170.

18. Ценопопуляции растений (основные понятия и структура). М.: Наука, 1976. 215 с.

19. Ценопопуляции растений (очерки популяционной биологии). М.: Наука, 1988. 184 с.

20. Смирнова О.В. Структура травяного покрова широколиственных лесов. М.: Наука, 1987. 207 с.

21. Жукова Л.А. Популяционная жизнь луговых растений. Йошкар-Ола: РИИК «Ланар», 1995. 224 с.

22. Исаева А.У., Ешибаев А.А., Саданов А.К., Акынова Л.А. Влияние различных фракций нефти на морфометрические параметры растений // Теоретическая и прикладная экология. 2008. № 2. С. 51–54.

23. Уранов А.А. Возрастной спектр фитоценопопуляции как функция времени и энергетических волновых процессов // Научные доклады высшей школы. Биол. науки. 1975. № 2. С. 7–34.

24. Работнов Т.А. Вопросы изучения состава популяций для целей фитоценологии // Проблемы ботаники. 1950. Т. 1. С. 465–483.

25. Работнов Т.А. Некоторые вопросы изучения фитоценозов как систем ценологических популяций // Журнал общей биологии. 1982. Т. 43. № 2. С. 168–174.

26. Горшкова А.А. Основные черты пастбищной дигрессии в степных сообществах Сибири // Сибирский вестник сельскохозяйственной науки. 1983. № 4. С. 51–54.

27. Базилевич Н.И. Биологическая продуктивность экосистем Северной Евразии. М.: Наука, 1993. 293 с.

28. Черепанов С.К. Сосудистые растения России и сопредельных государств (в пределах бывшего СССР). СПб.: Мир и семья, 1995. 992 с.

29. Кожевникова Н.Д., Трулевич Н.В. Сухие степи Внутреннего Тянь-Шаня (Влияние выпаса на растительность и возрастной состав популяций основных растений). Фрунзе: Илим, 1971. 211 с.

30. Зверева Г.К. Сравнительная оценка воздействия выпаса и периодического срезания на степные растения Тувы // Экология. 2004. № 4. С. 410–414.

References

1. Konishev I.V., Nazarov A.G. Evolution of ideas of soil reconstruction. Part I. Ancient Time // Theoretical

- and Applied Ecology. 2010. No. 2. P. 65–71 (in Russian). doi: 10.25750/1995-4301-2010-2-065-071
2. Gunin P.D., Miklyaeva I.M. Modern processes of degradation and desertification of ecosystems of the East Asian sector of steppes and forest-steppes // Modern global changes in the natural environment. Moskva: Nauka, 2006. V. 2. P. 389–412 (in Russian).
  3. Podkorytov A.T. Feeding and keeping of sheep in the conditions of Gorny Altai. Stavropol: FGBNU VNIIOK, 2017. 309 p. (in Russian).
  4. Gadzhiev M., Korolyuk A.Yu., Titlyanova A.A., Andrievsky V.S., Bayartogtokh B. Steppes of Central Asia. Novosibirsk: Publishing house of the SB RAS, 2002. 299 p. (in Russian).
  5. Gorshkova A.A. Pastures of Transbaikalia. Irkutsk: Vostochno-Sibirskoe knizhnoe izdatelstvo, 1973. 157 p. (in Russian).
  6. Gorchakovskiy P.L., Ryabinina Z.N. Steppe vegetation of the Ural-Ilek interfluvium, its anthropogenic degradation and conservation problems // Ecology. 1981. No. 3. P. 9–23 (in Russian).
  7. Rybashlykova L.P. Dynamics of vegetation of the phytomeliorated deflation zone on the territory of the Republic of Kalmykia // Theoretical and Applied Ecology. 2022. No. 2. P. 152–158 (in Russian). doi: 10.25750/1995-4301-2022-2-152-158
  8. Bestelmeyer B.T., Trujillo D.A., Tugel A.J., Havstad K.M. A multi-scale classification of vegetation dynamics in arid lands: what is the right scale for models, monitoring and restoration? // J. Arid. Env. 2006. V. 65. P. 296–318. doi: 10.1016/j.jaridenv.2005.06.028
  9. Hester A.J., Scogings P.F., Trollope W.S.W. Long-term impacts of goat browsing on bush-clump dynamics in a semi-arid subtropical savanna // Plant Ecol. 2006. V. 183. P. 277–290. doi: 10.1007/s11258-005-9039-6
  10. Hester A.J., Bergman M., Iason G.R., Moen R. Impacts of large herbivores on plant community structure and dynamics // Large herbivore ecology and ecosystem dynamics / Eds. K. Danell, R. Bergstrom, P. Duncan, J. Pastor. Cambridge: Cambridge Univ Press, 2006. P. 97–141.
  11. McIntyre S., Tongway D. Grassland structure in native pastures: links to soil surface condition // Ecol Manage Restor. 2005. No. 6. P. 43–50.
  12. Sonnier G., Shipley B., Navas M.-L. Quantifying relationships between traits and explicitly measured gradients of stress and disturbance in early successional plant communities // J. Veg. Sci. 2010. V. 21. No. 6. P. 1014–1024. doi: 10.1111/j.1654-1103.2010.01210.x
  13. Troy S., Tsolmon R., Middleton N., Thomas D. Tracking desertification on the Mongolian steppe through NDVI and field-survey data // International Journal of Digital Earth. 2011. V. 4. No. 1. P. 50–64. doi: 10.1080/17538940903506006
  14. Ward D. Long term effects of herbivory on plant diversity and functional types in arid ecosystems // Large herbivore ecology and ecosystem dynamics / Eds. K. Danell, R. Bergstrom, P. Duncan, J. Pastor. Cambridge: Cambridge Univ Press, 2006. P. 142–169. doi: 10.1017/cbo9780511617461.007
  15. Kononova N.A. Structure and productivity of herbaceous plant communities of the Krasnoyarsk forest-steppe // Theoretical and Applied Ecology. 2022. No. 1. P. 91–96 (in Russian). doi: 10.25750/1995-4301-2022-1-091-096
  16. Zvereva G.K., Syeva S.Ya., Karnaukhova N.A. Assessment of the state of vegetation on natural forage lands of Gorny Altai // Vestnik NGAU. 2019. V. 50. No. 1. P. 116–125 (in Russian).
  17. Urtnasan M., Lyubarskiy E.L. Pasture digression in the steppes of Central Mongolia // Scholarly Notes of Kazan University. 2013. V. 155. Book 1. Natural sciences. P. 158–170 (in Russian).
  18. Plant cenopopulations (basic concepts and structure). Moskva: Nauka, 1976. 215 p. (in Russian).
  19. Cenopopulations of plants (essays on population biology). Moskva: Nauka, 1988. 184 p. (in Russian).
  20. Smirnova O.V. The structure of the grass cover of broad-leaved forests. Moskva: Nauka, 1987. 207 p. (in Russian).
  21. Zhukova L.A. Population life of meadow plants. Yoshkar-Ola: Lanar, 1995. 224 p. (in Russian).
  22. Isaeva A.U., Eshibaev A.A., Sadanov A.K., Akynova L.A. Influence of various oil fractions on morphometric parameters of plants // Theoretical and Applied Ecology. 2008. No. 2. P. 51–54 (in Russian). doi: 10.25750/1995-4301-2008-2-051-54
  23. Uranov A.A. Age spectrum of phytocenopopulation as a function of time and energy wave processes // Nauchnye doklady vysshey shkoly. Biologicheskie nauki. 1975. No. 2. P. 7–34 (in Russian).
  24. Rabotnov T.A. Questions of studying the composition of populations for the purposes of phytocenology // Problems of botany. 1950. V. 1. P. 465–483 (in Russian).
  25. Rabotnov T.A. Some issues of studying phytocenoses as systems of cenotic populations // Journal of General Biology. 1982. V. 43. No. 2. P. 168–174 (in Russian).
  26. Gorshkova A.A. The main features of pasture digression in the steppe communities of Siberia // Siberian Herald of Agricultural Science. 1983. No. 4. P. 51–54 (in Russian).
  27. Bazilevich N.I. Biological productivity of ecosystems in Northern Eurasia. Moskva: Nauka, 1993. 293 p. (in Russian).
  28. Cherepanov S.K. Vascular plants of Russia and neighboring countries (within the former USSR). Sankt-Peterburg: Mir i semya, 1995. 992 p. (in Russian).
  29. Kozhevnikova N.D., Trulevich N.V. Dry steppes of the Inner Tien Shan (Influence of grazing on vegetation and age composition of populations of the main plants). Frunze: Ilim, 1971. 211 p. (in Russian).
  30. Zvereva G.K. Comparative assessment of the impact of grazing and periodic cutting on the steppe plants of Tuva // Ecology. 2004. No. 6. P. 410–414 (in Russian).

## Находка теплолюбивого гриба *Laetiporus sulphureus* на территории г. Кирова

© 2023. Д. В. Попыванов<sup>1</sup>, к. б. н., зав. лабораторией, с. н. с.,  
А. А. Широких<sup>1</sup>, д. б. н., в. н. с., Ю. А. Злобина<sup>1,2,3</sup>, аспирант, м. н. с.,

<sup>1</sup>Федеральный аграрный научный центр Северо-Востока  
имени Н. В. Рудницкого,

610007, Россия, г. Киров, ул. Ленина, д. 166а,

<sup>2</sup>Вятский государственный университет,  
610000, Россия, г. Киров, ул. Московская, д. 36,

<sup>3</sup>ООО «НИИЦ Миколайн»,  
610002, Россия, г. Киров, ул. Казанская, д. 190Б-15,  
e-mail: 1fast@mail.ru

Впервые на территории г. Кирова обнаружен съедобный лекарственный гриб трутовик серно-жёлтый, характеризующийся более южным ареалом обитания. Проведено выделение чистой культуры трутовика серно-жёлтого с помощью фрагмента плодового тела, извлечённого из внутренней части базидиокарпа. Видовая идентификация гриба подтверждена молекулярно-генетическим методом, результаты депонированы в GenBank: ON130354.1. Проведён филогенетический анализ внесённых в GenBank видов рода *Laetiporus*, имеющих широкий ареал распространения. Исследована антибиотическая активность изолята. Установлено, что гриб ингибирует рост грамположительной бактерии *Arthrobacter humicola* 30H и грамотрицательных видов *Pedobacter agri* 85Td, *Pseudomonas cepacia* 5809, *Erwinia rhapontici* ДАГ1-1. Проведено культивирование штамма на жидких питательных средах из растительных отходов, выявлено накопление сухой биомассы мицелия до 1,64 г/л.

**Ключевые слова:** базидиомицеты, трутовик серно-жёлтый, погружённое культивирование, антибиотики, изменение климата.

## Finding of the thermophilic fungus *Laetiporus sulphureus* on the territory of Kirov

© 2023. D. V. Popyvanov<sup>1</sup> ORCID: 0000-0002-4978-4542<sup>2</sup>

A. A. Shirokikh<sup>1</sup> ORCID: 0000-0002-7808-0376<sup>3</sup>

Yu. A. Zlobina<sup>1,2,3</sup> ORCID: 0000-0002-0949-1403<sup>3</sup>

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

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

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

<sup>3</sup>LLC “Scientific Research Innovation Center Mycoline”,

190b-15, Kazanskaya St., Kirov, Russia, 610002,

e-mail: 1fast@mail.ru

The first discovery of edible medicinal mushroom sulfur-yellow tinder on the territory of Kirov was registered. The local climate is characterized by the predominance of continental air of temperate latitudes and the weather is unstable in terms of temperatures and precipitation throughout the year. The region is characterized by a long moderately cold and snowy winter, a prolonged spring, early autumn and a moderately warm short summer. The average air temperature in the city of Kirov in winter is -9.2 °C, in summer it is +16.4 °C. The annual precipitation is 582 mm, of which 60–70% falls on the warm season. A pure culture of sulfur-yellow tinder was isolated using a fragment of the fruit body extracted from the inner part of the basidiocarp. The growth rate of isolate *Laetiporus sulphureus* NV on wort agar was 10.6 mm/day, on PGA – 7.8 mm/day. Species identification of the fungus was confirmed by molecular genetic method, the results were deposited in GenBank: ON130354.1. Phylogenetic analysis of species of the genus *Laetiporus* was carried out. The antibiotic activity of the isolate was studied. It was found that the fungus inhibits the growth of gram-positive bacteria *Arthrobacter humicola* 30H, *Pedobacter agri* 85Td and gram-negative species *Pseudomonas cepacia* 5809, *Erwinia rhapontici*

*tici* DAG1-1. As a result of the liquid-phase cultivation of the *L. sulphureus* NV isolate on various liquid nutrient media using a magnetic stirrer, it was found that the greatest accumulation of biomass on 20 days of cultivation is observed on a liquid medium based on a decoction of barley husk with the addition of 2% glucose. The accumulation of dry mycelium biomass up to 1.64 g/L was revealed.

**Keywords:** basidiomycetes, sulfur yellow tinder, submerged cultivation, antibiotics, climate.

Трутовик серно-жёлтый *Laetiporus sulphureus* (Bull.) Murrill – базидиальный гриб, вызывающий бурую гниль древесины в основном лиственных пород деревьев. Однолетние плодовые тела ярко-жёлтого цвета, имеют приятный грибной запах и съедобны в молодом возрасте. Серно-жёлтый трутовик имеет широкий ареал распространения (рис. 1, см. цв. вкладку VII).

По имеющимся литературным данным, ареал распространения вида – Европа, Азия и Северная Америка от бореальных до тропических зон [1–4].

На территории Кировской области находки серно-жёлтого трутовика отмечены в заповеднике «Нургуш», который находится в юго-восточной части Котельничского района Кировской области. Плодовые тела гриба обнаружены на валежных и сухостойных стволах *Quercus robur* [5], а также на территории Государственного природного заказника «Пижемский», расположенного вдоль рек Немда и Пижма в юго-западной части Кировской области [6].

На территории г. Кирова до 2021 г. не было описано находок *L. sulphureus*, несмотря на то, что исследования видовой разнообразия микобиоты проводились [7].

Согласно литературным данным и сведениям платформы inaturalist.org находок трутовика серно-жёлтого севернее территории г. Кирова не зарегистрировано. Впервые отмеченная находка *L. sulphureus* на древесине *Acer negundo* относится к 2021 г. Обнаруженное нами плодовое тело трутовика серно-жёлтого (рис. 2, см. цв. вкладку VII) находилось также на стволе *Acer negundo* в парке им. С.М. Кирова (г. Киров 58,588979° с. ш., 49,657883° в. д.). Время находки – июнь 2021 г.

Город Киров расположен в месте расщепления Верхнекамской возвышенности долиной реки Вятки. Основная часть городской территории располагается на левом крутом берегу Вятки, в Средневятской (Кировской) низменности, на семи крупных холмах. Преобладает континентальный воздух умеренных широт и погода, неустойчивая по температурам и осадкам в течение года. Для региона характерна продолжительная умеренно холодная и

снежная зима, затяжная весна, ранняя осень и умеренно тёплое короткое лето. Близость области к Северному Ледовитому океану и отсутствие барьеров для проникновения арктических воздушных масс обуславливают возможность вторжений северо-западных и северных циклонов, вызывающих приток холодного арктического воздуха и резкое изменение погоды.

Климатические изменения позволяют термофильным видам осваивать более северные ареалы местообитания. Согласно данным архива погоды (<http://weatherarchive.ru>), 2021 г. в Кировской области характеризовался более тёплым летним периодом. Так, средняя температура в мае 2021 г. составляла +15,1 °С (за период 2014–2022 гг. средняя температура составила +11,9 °С), в июне 2021 г. средняя температура составила +20 °С (за период 2014–2022 гг. средняя температура составила +11,9 °С). Данный факт позволяет сделать вывод о более широком ареале распространения вида *L. sulphureus*, плодоношение которого наступает лишь при благоприятных условиях (более высокой средней температуре), чем описано в литературных источниках [1–7].

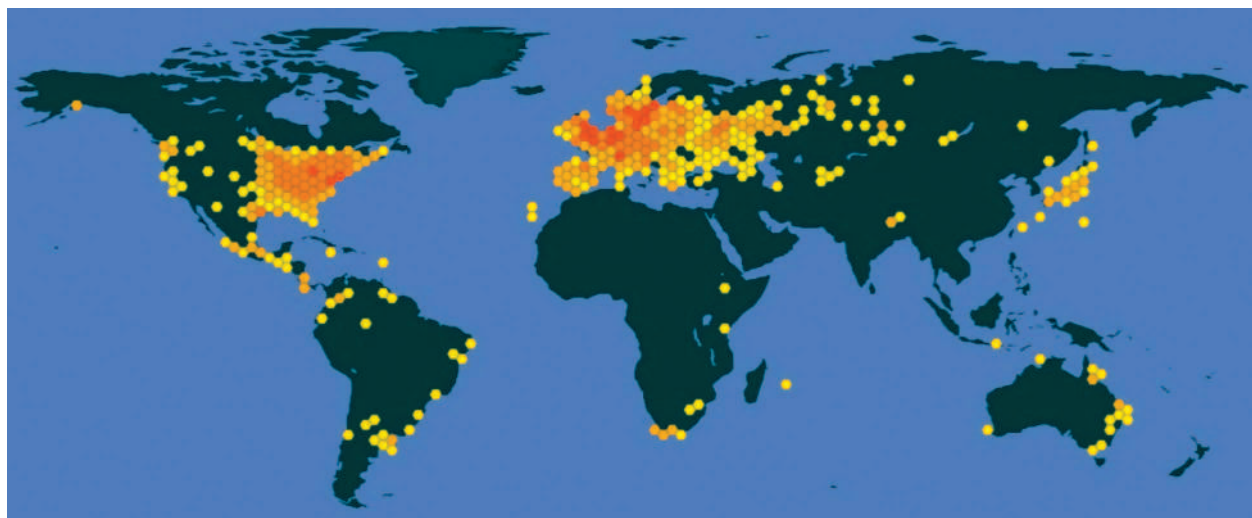
Цель работы – выделить в культуру штамм трутовика серно-жёлтого, провести филогенетический анализ по внутреннему транскрибируемому спейсеру рибосомальной ДНК (ITS), проверить антимикробную активность штамма и рассмотреть возможность использования штамма в целях биоконверсии отходов растениеводства.

### Объекты и методы исследования

С целью выделения чистой культуры трутовика серно-жёлтого использован метод изоляции мицелия из плодового тела. Собранное плодовое тело гриба было разрезано стерильным скальпелем в условиях ламинарного бокса. Фрагмент плодового тела, извлечённый из внутренней части базидиокарпа, обработан 3% перекисью водорода и помещён на агаризованное пивное сусло, разведённое до 4° по Баллингу.

После 5 пассажей на агаризованное пивное сусло, микроморфологию *L. sulphu-*

**Д. В. Попыванов, А. А. Широких, Ю. А. Злобина**  
**«Находка теплолюбивого гриба**  
***Laetiporus sulphureus* на территории г. Кирова». С. 181.**



**Рис. 1.** Ареал распространения *Laetiporus sulphureus* согласно данным GBIF Global Biodiversity Information Facility (<https://www.gbif.org/>)  
**Fig. 1.** Distribution area of *Laetiporus sulphureus* according to GBIF data (<https://www.gbif.org/>)



**Рис. 2.** Плодовое тело *L. sulphureus*, обнаруженное в парке им. С.М. Кирова  
**Fig. 2.** The fruiting body of *L. sulphureus*, found in the park named by S.M. Kirov

Д. В. Попыванов, А. А. Широких, Ю. А. Злобина  
«Находка теплолюбивого гриба  
*Laetiporus sulphureus* на территории г. Кирова». С. 181.

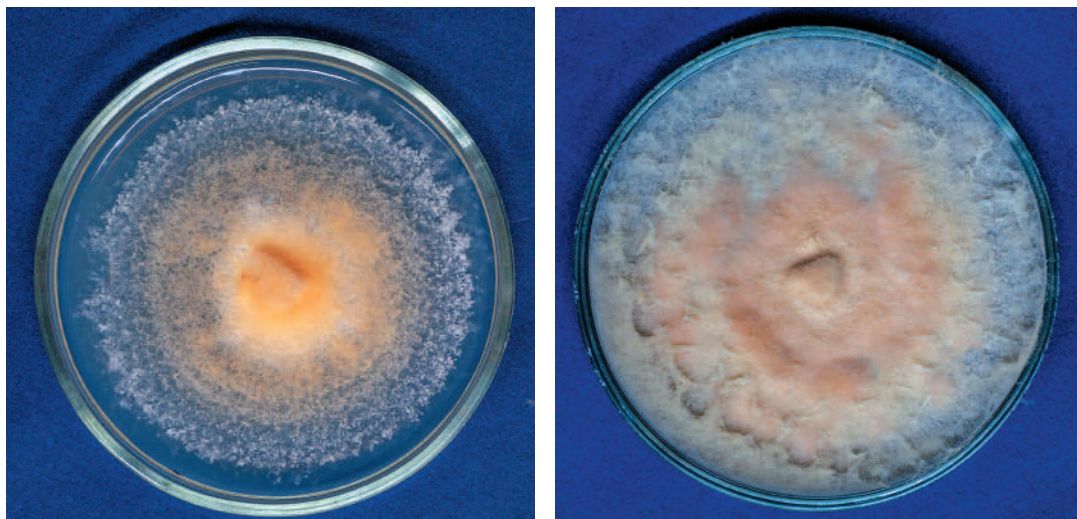


Рис. 3. Морфология колоний *L. sulphureus* на различных по составу питательных средах: картофельно-глюкозный агар (слева) и сусло-агар (справа)  
Fig. 3. Morphology of *L. sulphureus* colonies on nutrient media of different composition: potato glucose agar (left) and wort agar (right)

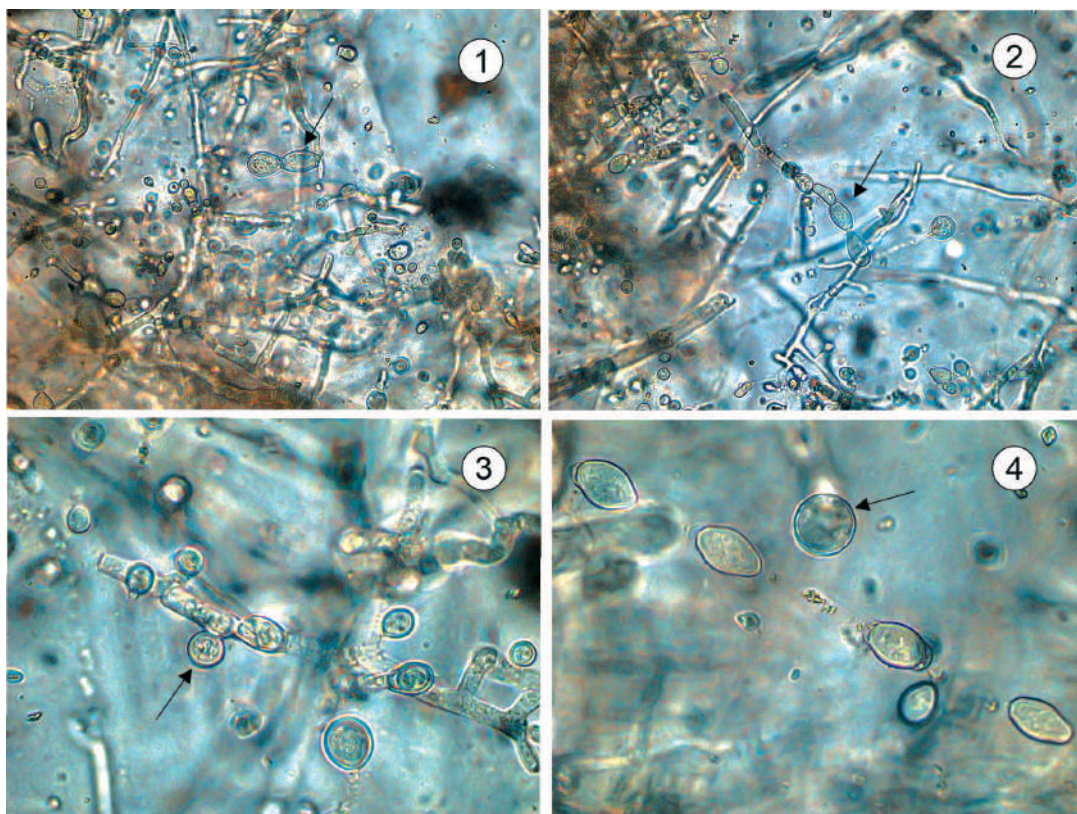


Рис. 4. Бластоконидии (1, 2 –  $\times 400$ ) и хламидоспоры (3, 4 –  $\times 100$ ) *L. sulphureus*  
Fig. 4. Blastoconidia (1, 2 –  $\times 400$ ) and chlamydospores (3, 4 –  $\times 100$ ) of *L. sulphureus*



*reus* исследовали с помощью микроскопа Leica DM2500. Колонии рыхлые, порошковые, бледно-оранжевого цвета, возвышающиеся над субстратом (рис. 3, см. цв. вкладку VIII). Мицелий образован септированными клетками, пряжки на гифах отсутствуют, отмечается наличие бластоконидий и хламидоспор (рис. 4, см. цв. вкладку VIII). Характерные морфологические особенности колонии трутовика серно-жёлтого совпадают с описанными ранее в литературе [8]. Скорость роста на сусло-агаре изолята *L. sulphureus* NV составила 10,6 мм/сут, на картофельно-глюкозный агар (КГА) – 7,8 мм/сут.

**Молекулярно-генетический анализ.** Определение нуклеотидной последовательности внутреннего транскрибируемого спейсера рибосомальной ДНК (ITS) проводилось на базе ФГБНУ Всероссийский научно-исследовательский институт сельскохозяйственной биотехнологии (г. Москва).

Анализ нуклеотидной последовательности проведён с применением алгоритма сравнения гомологичных последовательностей BlastN с ресурсами доступных баз данных GenBank.

В работе использовали 27 нуклеотидных последовательностей штаммов *L. sulphureus*, доступных в базе данных GenBank. Выравнивание нуклеотидных последовательностей и построение филогенетического дерева проводили с помощью программы MEGA X [9], использующей алгоритм множественного выравнивания ClustalW с последующим редактированием в ручном режиме. Филогенетическое дерево было построено с помощью метода максимального правдоподобия (maximum likelihood – ML) с использованием модели Tamura-Nei [10]. В качестве независимых эволюционных линий рассматривались клады с bootstrap-значениями (1000 репликаций)  $\geq 70\%$ .

Полученная в результате секвенирования нуклеотидная последовательность была депонирована в международную базу GenBank под номером ON130354. В качестве сравнительного материала были использованы ITS-последовательности близких видов из рода *Laetiporus*, взятые из GenBank (от 13.09.2022) (табл. 1).

Исследование антимикробной активности *L. sulphureus* проводили методом агаровых блоков с использованием тест-культур грамположительных и грамотрицательных бактерий. В качестве тест-культур грамположительной бактерии был использован штамм *Arthrobacter humicola* 30Н, а в каче-

стве грамотрицательных – штаммы *Ewingella americana* 66MT, *Pseudomonas cepacia* 5809, *Erwinia rhapontici* ДАГ1-1 из коллекции лаборатории биотехнологии растений и микроорганизмов ФАНЦ Северо-Востока им. Н.В. Рудницкого.

Исследование способности гриба к биоконверсии растительных отходов проведено на жидких средах: капустной среде № 19 [11], модифицированной капустной среде с пептоном – 1%, сахарозой – 2% и триптофаном – 0,02%, капустной среде с молочной сывороткой – 1% [12] и жидкой среде на основе отвара ячменной лузги (150 г сухой лузги на 1 л водопроводной воды) с добавлением 2% глюкозы. Культивирование гриба проводилось в колбах с объёмом питательной среды 250 мл в четырёхкратной аналитической повторности. Для их инокуляции использовали выращенную на КГА колонию, мицелий отбирали пробочным сверлом с диаметром 10 мм. Количество посевного материала: 3 агаровых блока с мицелием диаметром 10 мм. Перемешивание культуральной жидкости осуществлялось с помощью магнитной мешалки при скорости 400 об./мин. Температура культивирования 25 °С. После 20 сут культивирования проводилось отделение мицелиальной массы центрифугированием и её высушивание до абсолютно сухого состояния (АСБ) при 105 °С.

### Результаты и обсуждение

Согласно опубликованным данным, по филогенетической структуре рода *Laetiporus*, выделяют несколько видов трутовика серно-жёлтого [13, 14].

Вид *L. montanus* встречается в горных районах Центральной Европы и в Китае, где растёт на хвойных деревьях. Особенностью вида является то, что он не отличим морфологически от широко распространённого *L. sulphureus*, отличия есть лишь на генетическом уровне. Проведённый анализ депонированных в GenBank последовательностей позволил выделить отдельную кладу данного вида (bootstrap-значение 77) (рис. 5). Также стоит отметить, что в данную кладу вошёл штамм Ls 1-06 (KF932732), выделенный в Республике Тыва на лиственнице и, возможно, ошибочно депонированный в GenBank как *L. sulphureus*.

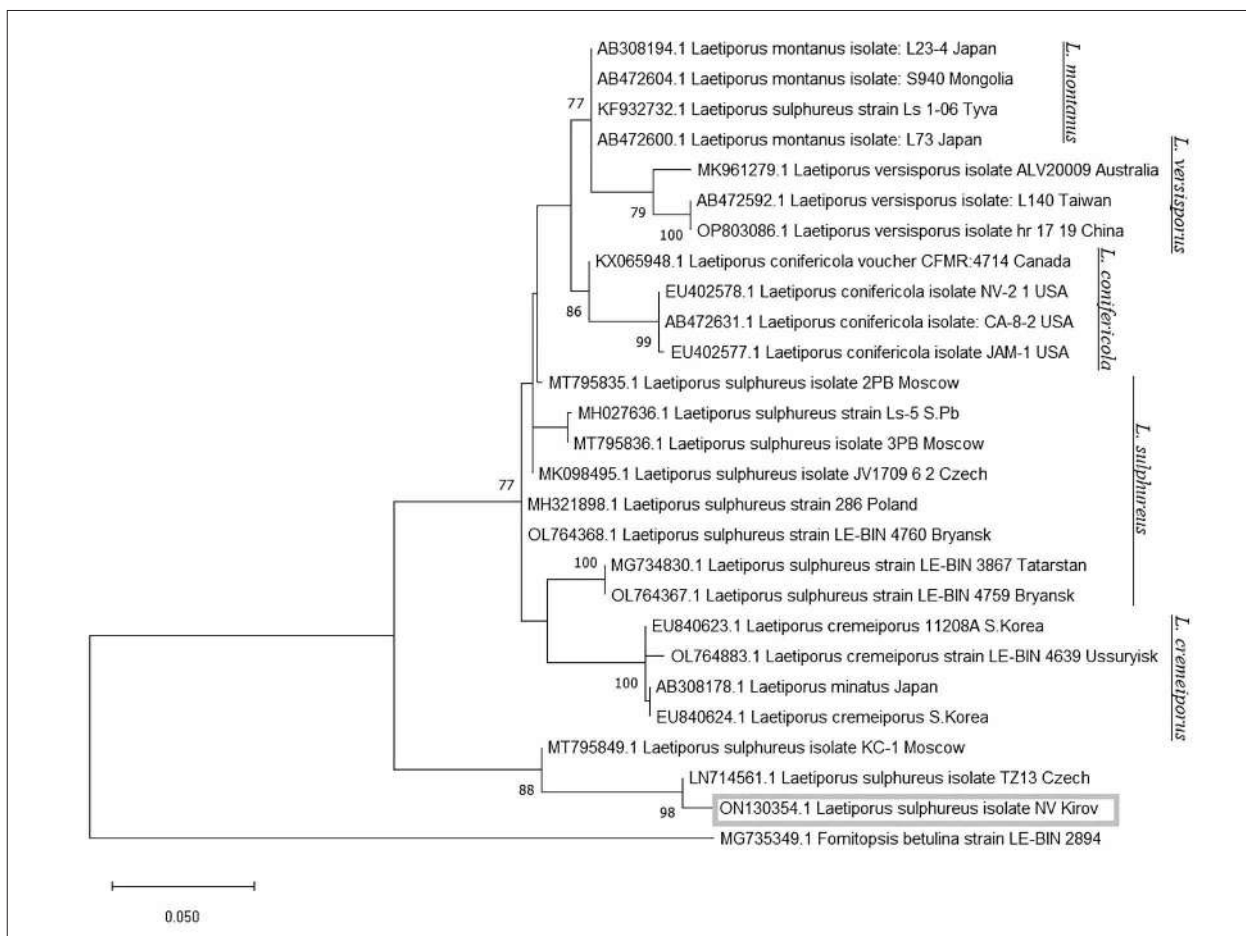
Вид *L. versisporus* встречается в основном в южной части Японии. Созревшие плодовые тела полукруглые и состоят из большого числа хламидоспор, гименофор практически не об-

Таблица 1 / Table 1

Список образцов нуклеотидных последовательностей,  
использованных при филогенетическом анализе  
List of samples of nucleotide sequences used in phylogenetic analysis

Наименование таксона Taxon name	Место нахождения образца Sample Location	GenBank ID	Субстрат выделения Substrate	Коллектор Collector
<i>L. montanus</i>	Монголия: Уланбаатор Mongolia: Ulaanbaatar	AB472604	<i>Picea glehnii</i>	Ota Y., Hattori T. [13]
	Япония: Яманаша Japan: Yamanashi	AB308194	Conifer	
	Япония: Хоккайдо Japan: Hokkaido	AB472600	<i>Picea glehnii</i>	
<i>L. versisporus</i>	Тайвань / Taiwan	AB472592	–	Xu T., Liu S. [14] Bellchambers J. [14] Ota Y., Hattori T. [13]
	Китай / China	OP803086	–	
	Австралия / Australia	MK961279	–	
	Япония: Кагوشيما Japan: Kagoshima	AB308148	–	
<i>L. cremeiporus</i>	Россия: Уссурийск Russia: Ussuriysk	OL764883	Fallen dry wood	Psurtseva N.V. et al. [14]
	Южная Корея South Korea	EU840624	<i>Carpinus laxiflora</i>	Vasaitis R. et al. [15]
		EU840623	<i>Abies holophylla</i>	
	OM809760	–	Lee S.H. [14]	
Япония: Кумамото Japan: Kumamoto	AB308178	Hardwood	Ota Y., Hattori T. [13]	
<i>L. sulphureus</i>	Россия, Санкт-Петербург Russia, Saint-Petersburg	MH027636	–	Shnyreva A.V., Shnyreva A.A. [14]
	Россия, Тува Russia, Tuva	KF932732	<i>Larix</i>	Shnyreva A.V et al. [14]
	Россия, Брянская обл. Russia, Bryansk Region	OL764368	<i>Betula pendula</i>	Shakhova N.V., Volobuev S.V. [14]
		OL764367	<i>Quercus robur</i>	
	Россия, Московская обл. Russia, Moscow Region	MT795849	<i>Oak wood</i>	Kurakov A.V. [14]
		MT795836	Hardwood	
		MT795835	Hardwood	
	Россия: Республика Татарстан Russia: Republic of Tatarstan	MG734830	On fallen rotten trunk of oak	Kolker T.L. et al. [14]
	Чехия / Czech	LN714561	–	Vetrovsky T. et al. [14]
	Хорватия / Croatia	MK169234	–	Mesic A. et al. [16]
Чехия / Czech	MK098495	<i>Robinia</i> sp.	Kout J. et al. [14]	
Польша / Poland	MH321898	–	Mazur I. et al. [14]	
<i>L. conifericola</i>	Канада / Canada	KX065948	–	Maynard D.S. et al. [14]
	США / USA	AB472631	–	Ota Y., Hattori T. [13]
	США / USA	EU402578	<i>Pinus contorta</i>	Lindner D.L., Banik M.T. [17]
	США / USA	EU402577	<i>Tsuga heterophylla</i>	

Примечание. Прочерк в таблице обозначает отсутствие информации о типе субстрата выделения в базе данных.  
Note. A dash in the table indicates the absence of information about the type of extraction substrate in the database.

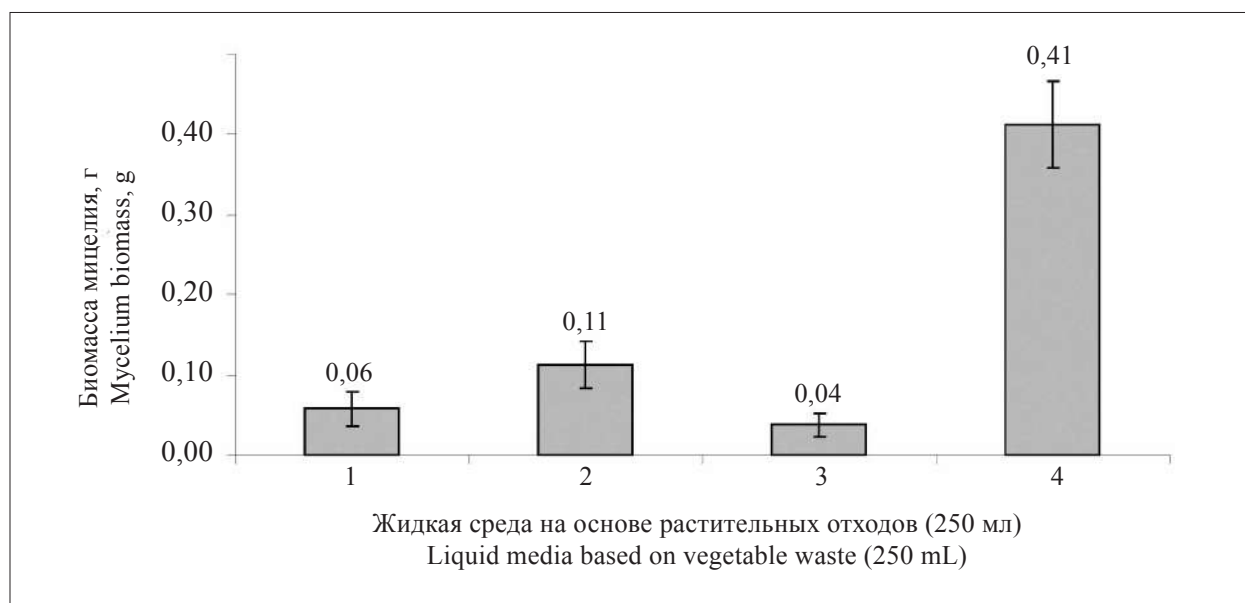


**Рис. 5.** Филогенетическое дерево для последовательностей ITS, депонированных в GenBank, построенное методом максимального правдоподобия  
**Fig. 5.** Phylogenetic tree for ITS sequences deposited in GenBank constructed by the maximum likelihood method

**Таблица 2 / Table 2**

Результаты сравнения ITS последовательности обнаруженного образца *Laetiporus sulphureus* (ON130354) с данными международной базы GenBank (с использованием программы BLAST)  
 Comparison results of the ITS sequence of the detected *Laetiporus sulphureus* (ON130354) specimen with the data of the international GenBank database (using the BLAST)

GenBank ID	Название таксона Taxon name	Сравниваемая часть сиквенса, % Query cover, %	Сходство сиквенсов, % Percent identity	Длина сиквенса, пар нуклеотидов Accession length, pairs of nucleotides	Место нахождения образца Sample location
<i>Laetiporus sulphureus</i> ON130354, длина сиквенса 480 пар нуклеотидов, Россия: Киров <i>Laetiporus sulphureus</i> ON130354, sequence length 480 bp, Russia: Kirov					
LN714561	<i>Laetiporus sulphureus</i>	91	99,45	641	Чехия / Czech
MK169234		93	98,67	589	Хорватия / Croatia
MK098495		93	98,67	564	Чехия / Czech
MH321898		93	98,67	606	Польша / Canada
KX065948	<i>Laetiporus conifericola</i>	90	98,61	482	Канада / Canada
AB472631		90	98,61	529	США / USA
EU402578		90	98,61	560	
EU402577		90	98,61	560	



**Рис. 6.** Величина биомассы сухого мицелия изолята *L. sulphureus* NV на различных жидких питательных средах объёмом 250 мл на 20 сутки культивирования: 1 – капустная среда с молочной сывороткой, 2 – капустная среда № 19, 3 – модифицированная капустная среда с триптофаном, 4 – ячменная среда  
**Fig. 6.** The biomass value of dry mycelium of *L. sulphureus* NV isolate on various liquid nutrient media with a volume of 250 mL on the 20th day of cultivation: 1 – Cabbage medium with milk whey, 2 – Cabbage medium No. 19, 3 – Modified cabbage medium with tryptophan, 4 – Barley medium

разуется. Пores жёлтого цвета. Окраска плодовых тел сначала лимонно-жёлтая, затем – белая, часто с коричневым оттенком [13]. Виды *L. versisporus* составляют отдельную кладу (bootstrap-значение 79) (рис. 5).

Вид *L. cremeiporus* морфологически отличается от *L. versisporus* белым цветом поверхности пор. Вид образует отдельную кладу (bootstrap-значение 100). Кроме образцов из Японии и Китая, в кладу входит и образец, выделенный на Горнотаёжной станции им. В.Л. Комарова (OL764883) в 2021 г., что свидетельствует о присутствии вида на территории России (рис. 5).

Анализ полученной ITS-последовательности для нашего образца *L. sulphureus* (GenBank ID ON130354), проведённый с помощью алгоритма Blast, показал его сходство на 99,45% с образцом *Laetiporus sulphureus* с территории Чехии (табл. 2, рис. 5).

Изолят трутовика серно-жёлтого проявил высокую антимикробную активность по отношению к 4 из 5 бактериальным тест-культурам. Гриб одинаково хорошо ингибировал рост как грамположительных бактерий *A. humicola* 30H (зоны подавления роста от 20 до 35 мм), так и граммотрицательных видов *P. agri* 85Td, *P. seracia* 5809, *E. rhapontici* ДАГ1-1 (зоны подавления роста от 20 до 25 мм). Однако к условно-патогенному штамму *E. americana*

66МТ данный изолят *L. sulphureus* не проявил антагонистической активности.

Благодаря вкусовым и лекарственным свойствам трутовик серно-жёлтый активно используется в восточной медицине в качестве общеукрепляющего средства. Кроме того, есть сведения об употреблении гриба при онкологии молочной и предстательной желёз [18].

Современные исследования подтверждают высокую лекарственную и пищевую ценность *L. sulphureus*. Так, гриб является перспективным биологическим агентом в производстве белка, незаменимых аминокислот, ненасыщенных жирных кислот, каротиноподобных соединений и полисахаридов [12].

Высокая липидсинтезирующая способность некоторых штаммов *L. sulphureus* достигает 24% сухого веса мицелия, что выводит этот вид гриба в лидеры по синтезу липидов среди культивируемых базидиальных грибов [19–22]. Анализ жирнокислотного состава липидов трутовика серно-жёлтого показал преобладание в них эссенциальных ненасыщенных жирных кислот, сумма которых составила 83–88%. Количество линолевой кислоты достигало 57–77% [23].

Из плодовых тел *L. sulphureus* выделены и охарактеризованы два новых полисахарида: латипоран А (разветвлённый

$\beta$ -(1→3)-галактоманноглюкан) и латиглюкан I (линейный  $\beta$ -(1→3)-гомоглюкан) [24]. Фармакологически эти грибные соединения классифицируют как модификаторы биологических ответов (BRM, biological response modifiers), которые обладают антиопухолевыми активностью, связанной с активацией иммунной системы хозяина [25].

Исследование токсических свойств водных и спиртовых экстрактов *L. sulphureus* проведено отечественными учёными. Экстракты из биомассы мицелия получали путём смешивания дистиллированной воды и измельчённой биомассы при 60 °C на качалке в режиме 120 об./мин в течение пяти часов. Соотношение образца к экстрагенту составляло 1 : 30. Спиртовые экстракты были получены экстрагированием образца 96%-м этанолом с соотношением образца к экстрагенту – 1 : 10. В качестве тест-организмов использовали простейших (*Paramecium caudatum* и *Tetrahymena pyriformis*) – при спиртовой экстракции и белых крыс линии Wistar – при водной экстракции. В результате ни в одном из случаев токсических эффектов зарегистрировано не было [26].

В результате проведённого жидкофазного культивирования изолята *L. sulphureus* NV на различных жидких питательных средах с использованием магнитной мешалки было установлено, что наибольшее накопление АСБ на 20 сут культивирования наблюдается на жидкой среде на основе отвара ячменной лузги с добавлением 2% глюкозы (0,41 г в 250 мл среды) (рис. 6).

Полученные сведения согласуются с имеющимися данными по накоплению биомассы *L. sulphureus* при культивировании на жидкой капустной среде – от 1,9 г/л АСБ до 3,6 г/л АСБ на 30 сут культивирования [12].

### Заключение

Биомасса и культуральная жидкость некоторых ксилотрофных базидиомицетов представляет значительный потенциал в разработке новых регуляторов роста растений. Так, способность базидиальных грибов сорбировать тяжёлые металлы, обладающие цитотоксическим действием на растения, может быть использована в разработке биопрепаратов, обладающих адаптогенным и протекторным действием [27, 28]. Биологически активные компоненты культуральной жидкости и биомассы *L. sulphureus* (эссенциальные жирные кислоты, витамины, липиды, полисахариды)

являются перспективным объектом для более детальных исследований.

Подбор питательных сред на основе растительных сельскохозяйственных отходов в дальнейшем позволит снизить производственные затраты, сохраняя значительный биотехнологический потенциал культивируемой биомассы *L. sulphureus*.

*Работа выполнена в рамках государственного задания по теме № FNWE-2022-0008 «Разработка новых биотехнологических методов создания перспективных генотипов сельскохозяйственных культур со стабильной продуктивностью, толерантных к эдафическим стрессорам, получение нового исходного материала регенератного происхождения для селекции адаптивных сортов растений», номер государственной регистрации в ЕГИСУ № 123011900027-2.*

### Литература

1. Khatua S., Ghosh S., Acharya K. *Laetiporus sulphureus* (Bull.: Fr.) Murr. as food as medicine // Pharmacognosy Journal. 2017. V. 9. No. 6. P. 1–15.
2. Alquini G., Carbonero E.R., Rosado F.R., Cosentino C., Iacomini M. Polysaccharides from the fruit bodies of the basidiomycete *Laetiporus sulphureus* (Bull.: Fr.) Murr // FEMS Microbiology Letters. 2004. V. 230. No. 1. P. 47–52.
3. Hettich U., Sieber T.N., Holdenrieder O. Interaction between *Heterobasidion parviporum* and *Laetiporus sulphureus* // Root and butt rots of forest trees: 12 International Conference on Root and Butt Rots the University of California. Berkeley, 2008. P. 226–228.
4. Hood I.A. An introduction to fungi on wood in Queensland // Botany. School of Environmental Sciences and Natural Resources Management, University of New England: Armidale, NSW, 2003. 388 p.
5. Ставищенко И.В., Веселовская А.В. Афиллофоровые грибы заповедника «Нургуш» (Кировская область) // Микология и фитопатология. 2011. Т. 45. № 3. С. 260–270.
6. Ставищенко И.В., Лугинина Е.А. Афиллофоридные грибы государственного природного заказника «Былина» (Кировская область) // Микология и фитопатология. 2015. Т. 49. № 1. С. 41–49.
7. Попьянов Д.В., Широких А.А. Видовой состав и способность агарикомицетов к аккумуляции тяжёлых металлов в условиях урбозооэкосистемы // Микология и фитопатология. 2021. Т. 55. № 2. С. 138–147.
8. Теплякова Т.В., Косонова Т.А. Высшие грибы Западной Сибири – перспективные объекты для биотехнологии лекарственных препаратов. Новосибирск, 2014. 299 с.
9. Kumar S., Stecher G., Li M., Knyaz C., Tamura K. MEGA X: molecular evolutionary genetics analysis across

computing platforms // *Molecular Biology and Evolution*. 2018. V. 35. No. 6. P. 1547–1549.

10. Tamura K., Nei M. Estimation of the number of nucleotide substitutions in the control region of mitochondrial DNA in humans and chimpanzees // *Molecular Biology and Evolution*. 1993. V. 10. No. 3. P. 512–526.

11. Возняковская Ю.М. Микрофлора растений и урожая. Л.: Колос, 1966. 240 с.

12. Громовых Т.И., Иванова И.Е., Торкова А.А. Культивирование мицелия штаммов *Laetiporus sulphureus* (Bull.) Murrill для получения кормовой добавки // *Вестник Российской академии сельскохозяйственных наук*. 2012. № 6. С. 53–55.

13. Ota Y., Hattori T., Banik M.T., Hagedorn G., Sotome K., Tokuda S., Abe Y. The genus *Laetiporus* (Basidiomycota, Polyporales) in East Asia // *Mycological Research*. 2009. V. 113. No. 11. P. 1283–1300.

14. The National Center for Biotechnology Information [Электронный ресурс] <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/> (Дата обращения: 20.02.2023).

15. Vasaitis R., Menkis A., Lim Y.W., Seok S., Tomsovsky M., Jankovsky L., Stenlid J. Genetic variation and relationships in *Laetiporus sulphureus* s. lat., as determined by ITS rDNA sequences and *in vitro* growth rate // *Mycological Research*. 2009. V. 113. No. 3. P. 326–336.

16. Mesic A., Samec D., Jadan M., Bahun V., Tkalcic Z. Integrated morphological with molecular identification and bioactive compounds of 23 Croatian wild mushrooms samples // *Food Bioscience*. 2020. V. 37. Article No. 100720.

17. Lindner D.L., Banik M.T. Molecular phylogeny of *Laetiporus* and other brown rot polypore genera in North America // *Mycologia*. 2008. V. 100. No. 3. P. 417–430.

18. Переведенцева Л.Г. Лекарственные грибы Пермского края. Пермь: Проектное бюро «Рейкьявик», 2014. 144 с.

19. Уфимцева О.В., Миронов П.В. Получение биомассы мицелия грибов вешенки обыкновенной P 05/88 *Pleurotus ostreatus* и серно-жёлтого трутовика LS 1-06 *Laetiporus sulphureus* в глубоинных условиях // *Хвойные бореальной зоны*. 2009. Т. 26. № 2. С. 294–296.

20. Иванов А.И. Экологические аспекты развития грибоводства в России // *Теоретическая и прикладная экология*. 2021. № 3. С. 6–12.

21. Широких А.А., Злобина Ю.А., Широких И.Г. Биодegradация растительных отходов и получение плодовых тел при культивировании ежевика гребенчатого (*Hericium erinaceus*) // *Теоретическая и прикладная экология*. 2018. № 3. С. 86–92.

22. Полежаева Т.В., Худяков А.Н., Сергушкина М.И., Широких И.Г., Широких А.А., Безмельцева О.М., Зайцева О.О. Трaметоидные трутовики Русской равнины как источник полисахаридов с криопротекторными свойствами // *Теоретическая и прикладная экология*. 2017. № 3. С. 103–109.

23. Бабицкая В.Г., Иконникова Н.В., Пучкова Т.А., Осадчая О.В., Филимонова Т.В. Биохимический состав

композиций функционально-корректирующих препаратов на основе липид- и полисахаридсинтезирующих грибов // *Имунопатология, аллергология, инфектология*. 2010. № 1. С. 237–238.

24. Оленников Д.Н., Агафонова С.В., Боровский Г.Б., Пензина Т.А., Рохин А.В. Водорастворимые эндополисахариды плодовых тел *Laetiporus sulphureus* (Bull.: Fr.) Murr // *Прикладная биохимия и микробиология*. 2009. Т. 45. № 5. С. 597–605.

25. Шнырева А.В. Иммуномодулирующие свойства полисахаридов высших базидиальных грибов // *Успехи медицинской микологии*. 2004. Т. 3. С. 189–191.

26. Громовых Т.И., Иванова И.Е., Шнырева А.В., Баргесян Г.Г., Данильчук Т.Н., Левин М.А. Исследование токсических свойств штамма LS 1-06 *Laetiporus sulphureus* (Bull.) Murrill. и оценка перспектив его использования // *Проблемы медицинской микологии*. 2013. Т. 15. № 4. С. 63–69.

27. Бызова М.А., Ермошин А.А., Киселёва И.С. Экстракты трутовых грибов уменьшают цитотоксичность ионов кадмия в *Hordeum*-тесте // *Biomics*. 2022. Т. 14. № 4. С. 310–314.

28. Ermoshin A., Kiseleva I., Sinenko O., Nikkonen I., Novikov V. Fomes fomentarius extract decrease negative impact of cadmium ions in barley seedlings // *Biology and Life Sciences Forum*. 2020. V. 4. No. 1. Article No. 94.

## References

1. Khatua S., Ghosh S., Acharya K. *Laetiporus sulphureus* (Bull.: Fr.) Murr. as food as medicine // *Pharmacognosy Journal*. 2017. V. 9. No. 6. P. 1–15. doi: 10.5530/pj.2017.6s.151

2. Alquini G., Carbonero E.R., Rosado F.R., Cosentino C., Iacomini M. Polysaccharides from the fruit bodies of the basidiomycete *Laetiporus sulphureus* (Bull.: Fr.) Murr // *FEMS Microbiology Letters*. 2004. V. 230. No. 1. P. 47–52. doi: 10.1016/S0378-1097(03)00853-X

3. Hettich U., Sieber T.N., Holdenrieder O. Interaction between *Heterobasidion parviporum* and *Laetiporus sulphureus* // *Root and butt rots of forest trees: 12 International Conference on Root and Butt Rots the University of California*. Berkeley, 2008. P. 226–228.

4. Hood I.A. An introduction to fungi on wood in Queensland // *Botany. School of Environmental Sciences and Natural Resources Management, University of New England: Armidale, NSW, 2003*. 388 p.

5. Stavishenko I.V., Veselovskaya A.V. Aphylophoric fungi of the Nurgush Reserve (Kirov Region) // *Mycology and Phytopathology*. 2011. V. 45. No. 3. P. 260–270 (in Russian).

6. Stavishenko I.V., Luginina E.A. Aphylophoroid fungi of the state nature reserve “Bylina” (Kirov Region) // *Mycology and Phytopathology*. 2015. V. 49. No. 1. P. 41–49 (in Russian).

7. Popyvanov D.V., Shirokikh A.A. Species composition and ability of agaricomycetes to accumulate heavy metals in urban ecosystems // *Mycology and Phytopathology*. 2021. V. 55. No. 2. P. 138–147 (in Russian). doi: 10.31857/S0026364821020082
8. Teplyakova T.V., Kosogova T.A. Higher fungi of Western Siberia – promising objects for the biotechnology of drugs. Novosibirsk, 2014. 299 p.
9. Kumar S., Stecher G., Li M., Knyaz C., Tamura K. MEGA X: molecular evolutionary genetics analysis across computing platforms // *Molecular Biology and Evolution*. 2018. V. 35. No. 6. P. 1547–1549. doi: 10.1093/molbev/msy09
10. Tamura K., Nei M. Estimation of the number of nucleotide substitutions in the control region of mitochondrial DNA in humans and chimpanzees // *Molecular Biology and Evolution*. 1993. V. 10. No. 3. P. 512–526. doi: 10.1093/oxfordjournals.molbev.a040023
11. Voznyakovskaya Yu.M. Plant microflora and harvest. Leningrad: Kolos, 1966. 240 p. (in Russian).
12. Gromovykh T.I., Ivanova I.E., Torkova A.A. Cultivation of mycelium of *Laetiporus sulphureus* (Bull.) Murill strains for obtaining a feed additive // *Vestnik of the Russian Agricultural Science*. 2012. No. 6. P. 53–55 (in Russian).
13. Ota Y., Hattori T., Banik M.T., Hagedorn G., Sotome K., Tokuda S., Abe Y. The genus *Laetiporus* (Basidiomycota, Polyporales) in East Asia // *Mycological Research*. 2009. V. 113. No. 11. P. 1283–1300. doi: 10.1016/j.mycres.2009.08.014
14. The National Center for Biotechnology Information [Internet resource] <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/> (Accessed: 20.02.2023).
15. Vasaitis R., Menkis A., Lim Y.W., Seok S., Tomsovsky M., Jankovsky L., Stenlid J. Genetic variation and relationships in *Laetiporus sulphureus* s. lat., as determined by ITS rDNA sequences and *in vitro* growth rate // *Mycological Research*. 2009. V. 113. No. 3. P. 326–336. doi: 10.1016/j.mycres.2008.11.009
16. Mescic A., Samec D., Jadan M., Bahun V., Tkalcec Z. Integrated morphological with molecular identification and bioactive compounds of 23 Croatian wild mushrooms samples // *Food Bioscience*. 2020. V. 37. Article No. 100720. doi: 10.1016/j.fbio.2020.100720
17. Lindner D.L., Banik M.T. Molecular phylogeny of *Laetiporus* and other brown rot polypore genera in North America // *Mycologia*. 2008. V. 100. No. 3. P. 417–430. doi: 10.3852/07-124R2
18. Perevedentseva L.G. Medicinal mushrooms of the Perm Region. Perm: Proektnoe byuro “Reykyavik”, 2011. 144 p. (in Russian).
19. Ufimtseva O.V., Mironov P.V. Obtaining biomass of mycelium of oyster mushroom P 05/88 *Pleurotus ostreatus* and sulfur-yellow tinder fungus LS 1-06 *Laetiporus sulphureus* in deep conditions // *Conifers of the Boreal Zone*. 2009. V. 26. No. 2. P. 294–296 (in Russian).
20. Ivanov A.I. Ecological aspects of mushroom growing development in Russia // *Theoretical and Applied Ecology*. 2021. No. 3. P. 6–12 (in Russian). doi: 10.25750/1995-4301-2021-3-006-012
21. Shirokikh A.A., Zlobina Yu.A., Shirokikh I.G. Biodegradation of plant waste and the production of fruit bodies during the cultivation of the lion’s mane mushroom (*Hericium erinaceus*) // *Theoretical and Applied Ecology*. 2018. No. 3. P. 86–92 (in Russian). doi: 10.25750/1995-4301-2018-3-086-092
22. Polezhaeva T.V., Khudyakov A.N., Sergushkina M.I., Shirokikh I.G., Shirokikh A.A., Bezmeltseva O.M., Zaytseva O.O. Trametoid tinder of the Russian Plain as a source of polysaccharides with cryoprotective properties // *Theoretical and Applied Ecology*. 2017. No. 3. P. 103–109 (in Russian). doi: 10.25750/1995-4301-2017-3-103-109
23. Babitskaya V.G., Ikonnikova N.V., Puchkova T.A., Osadchaya O.V., Filimonova T.V. Biochemical compositions of functional-correcting preparations on the basis of lipid- and polysaccharide-synthesizing fungi // *Immunopathology, Allergology, Infectology*. 2010. No. 1. P. 237–238 (in Russian).
24. Olennikov D.N., Agafonova S.V., Borovskiy G.B., Penzina T.A., Rokhin A.V. Water-soluble endopolysaccharides of the fruiting bodies of *Laetiporus sulphureus* (Bull.: Fr.) Murr // *Applied Biochemistry and Microbiology*. 2009. V. 45. No. 5. P. 597–605 (in Russian).
25. Shnyreva A.V. Immunomodulatory properties of polysaccharides of higher basidiomycetes // *Advances in Medical Mycology*. 2004. V. 3. P. 189–191 (in Russian).
26. Gromovykh T.I., Ivanova I.E., Shnyreva A.V., Bargesyan G.G., Danilchuk T.N., Levin M.A. Study of the toxic properties of the strain LS 1-06 *Laetiporus sulphureus* (Bull.) Murrill. and assessment of the prospects for its use // *Problems of Medical Mycology*. 2013. V. 15. No. 4. P. 63–69 (in Russian).
27. Byzova M.A., Ermoshin A.A., Kiseleva I.S. Polypore fungus extracts reduce the cytotoxicity of cadmium ions in the Hordeum-test // *Biomics*. 2022. V. 14. No. 4. P. 310–314. doi: 10.31301/2221-6197.bmcs.2022-30
28. Ermoshin A., Kiseleva I., Sinenko O., Nikkonen I., Novikov V. Fomes fomentarius extract decrease negative impact of cadmium ions in barley seedlings // *Biology and Life Sciences Forum*. 2020. V. 4. No. 1. Article No. 94. doi: 10.3390/IECPS2020-08746

## Влияние навозных стоков на почвенные фототрофные микроорганизмы

© 2023. Л. В. Кондакова<sup>1,2</sup>, д. б. н., профессор, с. н. с.,  
Н. В. Сырчина<sup>2</sup>, к. х. н., доцент, с. н. с., Л. В. Пилип<sup>3</sup>, к. в. н., доцент,  
И. А. Кондакова<sup>2</sup>, к. филол. н., доцент,

<sup>1</sup>Институт биологии Коми научного центра Уральского отделения  
Российской академии наук,

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

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

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

<sup>3</sup>Вятский государственный агротехнологический университет,

610017, Россия, г. Киров, Октябрьский проспект, д. 133,

e-mail: nvms1956@mail.ru, ecolab2@gmail.com, pilip\_larisa@mail.ru

Почвенные фототрофные микроорганизмы вносят значительный вклад в функционирование антропогенных экосистем, активно участвуя в самоочищении почвы путём непосредственного поглощения биогенных элементов и стимуляции деятельности микроорганизмов-минерализаторов за счёт выделяемого при фотосинтезе кислорода. Проведена оценка влияния долговременного внесения в пахотную почву навозных стоков свиноферм на видовое разнообразие почвенных фототрофных микроорганизмов. В почвах, подверженных воздействию жидких навозных стоков, сформировалась группировка видов, толерантных к данному воздействию. Её основу составляют зелёные водоросли: *Klebsormidium flaccidum*, *K. nitens*, *Chlorococcum infusionum*, *Chlorella vulgaris*, безгетероцистная цианобактерия *Phormidium autumnale*, диатомовая водоросль *Hantzschia amphioxys*. Общее видовое разнообразие микрофототрофов в почве экспериментального участка ниже, чем в контроле. Коэффициент Жаккара экспериментального и контрольного участков составляет 47,8%. Отсутствие в составе сообщества микрофототрофов азотфиксирующих цианобактерий указывает на нарушение естественного микроценоза пахотных почв и высокое содержание в почве азота.

**Ключевые слова:** водоросли, цианобактерии, жидкие навозные стоки.

## Manure runoff impact on soil phototrophic microorganisms

© 2023. L. V. Kondakova<sup>1,2</sup> ORCID: 0000-0002-2190-686X<sup>\*</sup>

N. V. Syrchina<sup>2</sup> ORCID: 0000-0001-8049-6760<sup>\*</sup>

L. V. Pilip<sup>3</sup> ORCID: 0000-0001-9695-7146<sup>\*</sup>

I. A. Kondakova<sup>2</sup> ORCID: 0000-0001-9336-8709<sup>\*</sup>

<sup>1</sup>Institute of Biology of the Komi Science Centre of the Ural Branch  
of the Russian Academy of Sciences,  
28, Kommunisticheskaya St., Syktyvkar, Russia, 167982,

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

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

<sup>3</sup>Vyatka State Agrotechnological University,

133, Oktyabrskiy Prospekt, Kirov, Russia, 610017,

e-mail: nvms1956@mail.ru, ecolab2@gmail.com, pilip\_larisa@mail.ru

Soil phototrophic microorganisms (algae, cyanobacteria) play a very important role in functioning of anthropogenic systems. They take an active part in soil self-purification by directly absorbing biogenic elements, as well as by stimulating the activity of mineralizing microorganisms at the expense of disengaged oxygen. The research was carried out at a plough field with sod-podzol soil situated near a large pig-breeding farm. Neutralization took place due to natural microbiological processes during the time of disgorging the liquid fraction in the lagoons. Long-term application of manure runoff from pig-breeding farms into plough soil had an impact on species diversity of phototrophic microorganisms, which was considered in the research. Groups of species tolerant to the impact formed in the soil in course of long-term application of liquid manure fraction. The influence of long-term runoff of manure from pig breeding farms on specious



diversity of soil phototrophic microorganisms was assessed. In plough soils affected by liquid manure runoff a group of species tolerant to this impact has formed. Their basis is represented by green algae: *Klebsormidium flaccidum*, *K. nitens*, *Chlorococcum infusionum*, *Chlorella vulgaris*, as well as by the heterocyst-free cyanobacteria *Phormidium autumnale* and the diatom alga *Hantzschia amphioxys*. On the surface of plough soil these species make microscopically marked films, i. e. soil “blooming” takes place. General species diversity of microphototrophs in soil of the experimental site is lower than that of the control site. Jaccard coefficient of the experimental and control sites of the field is 47.8%. Nitrogen-fixing cyanobacteria are not represented in the microphototrophic community; it indicates that the natural microcoenosis is damaged in the plough soils and nitrogen content is high.

**Keywords:** algae, cyanobacteria, liquid manure runoff.

Почвенные фототрофные микроорганизмы (водоросли, цианобактерии) относятся к числу первичных продуцентов, вносящих значительный вклад в функционирование наземных экосистем. Благодаря способности к оксигенному фотосинтезу и фиксации атмосферного азота, цианобактерии (ЦБ) принимают активное участие в биогеохимических циклах углерода, азота и фосфора [1–3], играют важную роль в почвообразовательных процессах, способствуют повышению плодородия и предотвращению деградации обрабатываемых земель [4]. Многие виды ЦБ и микроводорослей выделяют в окружающую среду (ОС) специфические биологически активные вещества, оказывающие стимулирующее влияние на развитие высших растений, а также вещества, подавляющие развитие почвенных фитопатогенов [5–7]. В ходе экспериментальных исследований последних лет установлена способность некоторых ЦБ метаболизировать пестициды и аккумулировать тяжёлые металлы [8, 9]. Соответствующие аспекты жизнедеятельности ЦБ имеют большое значение для поддержания супрессивности почв и защиты ОС от загрязнения. Благодаря проявляемым свойствам, ЦБ и микроводоросли находят всё более широкое применение в биотехнологии и «зелёных» технологиях выращивания и защиты сельскохозяйственных культур [10–12].

Большое влияние на видовой состав и количество почвенных ЦБ и микроводорослей оказывает характер использования земельных ресурсов [13]. Глубокая трансформация естественных микробиологических сообществ и нарушение их устойчивости наблюдается на землях сельскохозяйственного назначения, используемых для производства растениеводческой и животноводческой продукции [14, 15].

Интенсивная эксплуатация сельскохозяйственных угодий приводит к масштабному химическому и биологическому загрязнению ОС различными поллютантами [16–18]. Особую опасность для почвенной микробиоты представляют пестициды и содержащиеся в на-

возе животных антибиотики. Для почвенных микрфототрофов характерно образование симбиотических связей с другими микроорганизмами. Комплексное и систематическое воздействие разнообразных стресс-факторов вызывает детерминированные или стохастические сдвиги в стационарных профилях относительной численности микробиоты обрабатываемых земель, нарушает ассоциативные связи ЦБ и микроводорослей, характерные для естественных микробных консорциумов [19].

Работ, посвящённых влиянию навоза сельскохозяйственных животных и навозных стоков животноводческих предприятий на почвенные водоросли и ЦБ умеренных широт до настоящего времени немного. Согласно опубликованным данным [20], в составе альгогруппировок, подверженных действию стоков, было обнаружено 186 видов, относящихся к 6 отделам. Самыми многочисленными по количеству видов являлись зелёные водоросли из порядка Chlorococcales. В сильно загрязнённых почвах доминировали ЦБ, зелёные и эвгленовые водоросли. По мере самоочищения почвы увеличивалось видовое разнообразие зелёных, жёлтозелёных и диатомовых водорослей. Большинство обнаруженных в почве водорослей были обитателями как подверженной воздействию животноводческими стоками почвы, так и незагрязнённой почвы. Основу водорослевых группировок составляли виды, встречающиеся в массе: *Chlorella minutissima*, *Chlorococcum* sp., *Klebsormidium flaccidum*, *Xanthonema exile*, *Luticola mutica*, *Nitzschia palea*, *Hantzschia amphioxys*. Установлено, что под влиянием навозных стоков происходит повышение численности водорослей и ЦБ. В дерново-подзолистой загрязнённой навозными стоками почве численность ЦБ достигала 6595,5 тыс. клеток в 1 г абсолютно сухой почвы при общей численности 8242,45 тыс. клеток; незагрязнённой – меньше 3,6 тыс. при общей численности 47,41 тыс. клеток в 1 г абсолютно сухой почвы. На альгоцианофлору почвы навоз сельскохозяйственных животных и навозные стоки губительного действия не

оказывают. Увеличение численности водорослей происходит в основном за счёт интенсивного развития эврибионтных видов. Водоросли и ЦБ активно участвуют в самоочищении почвы путём непосредственного поглощения органических веществ и биогенных элементов, а также путём стимуляции деятельности микроорганизмов-минерализаторов за счёт выделяемого водорослями кислорода.

Следует отметить, что актуальный уровень экспериментальных данных, характеризующих влияние сельскохозяйственной деятельности на устойчивость локальных микробных сообществ, является недостаточным для объективной оценки возможных рисков для ОС и здоровья человека [21].

Цель настоящей работы состояла в оценке влияния на видовое разнообразие почвенных фототрофных микроорганизмов длительного внесения в пахотную дерново-подзолистую почву навозных стоков свиноферм.

#### Объекты и методы исследования

В качестве объекта исследования было выбрано пахотное поле, расположенное вблизи крупного свиноводческого комплекса Кировской области. Поле использовалось в кормовом севообороте. Почва дерново-подзолистая суглинистая. В течение последних 7 лет в соответствующую пашню вносили обезвреженную жидкую фракцию (ЖФ) свиных навозных стоков, откачиваемых из прудов-накопителей (лагунов). Процесс обезвреживания осуществлялся за счёт естественных микробиологических процессов в период выдерживания ЖФ в лагунах. Для внесения ЖФ применяли буксируемую шланговую систему. Нормы внесения рассчитывала агрохимическая служба предприятия, исходя из содержания в ЖФ азота. Среднегодовое внесение азота с ЖФ составляло 200 кг/га, что соответствует рекомендуемым нормам [22].

Отбор проб почвы на пахотном поле (экспериментальные пробы) для химических и микробиологических исследований проводили в сентябре 2022 г. после уборки урожая (кукурузы на силос) в соответствии с ГОСТ Р 58595-2019 с соблюдением стерильности, правил этикетирования и хранения проб. Контрольные пробы отбирали аналогично экспериментальным на расстоянии 500 м от экспериментального участка на окраине пашни у леса. Механический состав экспериментальных и контрольных проб был

одинаков – средний суглинок. Химические и микробиологические исследования отобранных проб выполняли в специализированных лабораториях Вятского государственного университета. Видовой состав водорослей определяли методами прямого микроскопирования почвы, постановкой водных и чашечных культур со «стёклами обрастания» [23]. Прямое микроскопирование поверхностных разрастаний позволяло определять виды, которые массово развивались на поверхности почвы. Инкубация культур проводилась при дневном освещении и в люминестате.

Все экспериментальные исследования проводили в трёхкратной повторности. Статистическую обработку результатов выполняли стандартными методами с использованием встроенного пакета программ Excel, STATISTICA 10.

#### Результаты и обсуждение

Результаты химического анализа отобранных проб почвы приведены в таблице 1.

Согласно приведённым в таблице 1 данным, химический состав проб почвы, отобранных на пахотном поле, существенно отличается от химического состава контрольных проб. Для экспериментальных проб характерна более низкая кислотность, очень высокое содержание подвижных форм фосфора и калия и более высокое, чем в контрольных пробах, содержание органического вещества, подвижной серы и микроэлементов (кроме Fe).

Данные, полученные в результате выполнения микробиологических исследований, приведены в таблице 2.

В наземных поверхностных разрастаниях принимают участие от 5 до 27 популяций фототрофных микроорганизмов. Видовое богатство фототрофного комплекса может возрастать при благоприятных условиях влажности и наличия биогенных элементов [24]. Видовой состав поверхностных разрастаний микрофототрофов является индикационным признаком. В плёнках «цветения» экспериментального и контрольного участков выявлено невысокое видовое разнообразие почвенных микрофототрофов – 12 видов, в том числе: Cyanobacteria – 1, Chlorophyta – 7, Bacillariophyta – 3, Xhantophyta – 1. На экспериментальном участке выявлено 9 видов, на контрольном – 12. Доминантами «цветения» экспериментального участка являлись нитчатые зелёные водоросли: *Klebsormidium flaccidum*, *K. nitens*, *K. rivulare*, развивающиеся в пахотных и це-

Таблица 1 / Table 1

Химический состав почвы / Chemical composition of soil

Показатель Index	Значение показателя / Index value		Метод анализа Analysis method
	эксперимент experiment	контроль control	
pH <sub>KCl</sub> , ед. pH pH <sub>KCl</sub> , pH unit	5,4±0,2	4,1±0,2	ГОСТ 26483-85 GOST 26483-85
Органическое вещество, % Organic matter, %	3,0±0,5	2,0±0,4	ГОСТ 26213-91 GOST 26213-91
Азот (NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> ), мг/кг Nitrogen (NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> ), mg/kg	2,9±0,8	1,2±0,5	ГОСТ Р 53219-2008 GOST Р 53219-2008
Азот (NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> ), мг/кг Nitrogen (NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> ), mg/kg	22±6	17±5	
Ca обменный, мг/кг Ca exchangeable, mg/kg	9,4±0,9	7,5±0,6	ГОСТ 26487-85 GOST 26487-85
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> подвижный, мг/кг P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> mobile, mg/kg	960±180	120±18	ГОСТ Р 54650-2011 GOST Р 54650-2011
K <sub>2</sub> O обменный, мг/кг K <sub>2</sub> O exchangeable, mg/kg	645±90	136±29	
Сера подвижная, мг/кг Sulfur mobile, mg/kg	9,4± 2,5	3,5±1,0	ГОСТ 26490-85 GOST 26490-85
Fe подвижное, мг/кг Fe mobile, mg/kg	21±5	35±5	Атомно-абсорбционный по ФР 1.31.2018.31189
Cu подвижная, мг/кг Cu mobile, mg/kg	1,8±0,5	1,6±0,5	Atomic absorbing according to FR 1.31.2018.31189
Zn подвижный, мг/кг Zn mobile, mg/kg	7,9±2,5	2,5±0,6	
Mn подвижный, мг/кг Mn mobile, mg/kg	132±30	13,4±0,5	

Таблица 2 / Table 2

Видовое разнообразие микрофототрофов в поверхностных разрастаниях  
Species diversity of microphototrophs in surface spreads

№ / No.	Отделы, виды / Groups, species	1	2
<b>Cyanobacteria</b>			
1	<i>Phormidium autumnale</i> (Ag.) Gom.	+	+
<b>Chlorophyta</b>			
2	<i>Chlorella minutissima</i> Fott et Novakova	-	+
3	<i>C. vulgaris</i> Beijer.	+	+
4	<i>Chlamydomonas gloeogama</i> Korsch. in Pasch.	-	+
5	<i>Klebsormidium nitens</i> (Menegh. in Kütz.) Lokh.	+	+
6	<i>K. flaccidum</i> (Kütz.) Silva et al.	+	+
7	<i>K. rivulare</i> (Kütz.), comb. nova	+	+
8	<i>Follicularia paradoxalis</i> Miller	-	+
<b>Bacillariophyta</b>			
9	<i>Navicula pelliculosa</i> (Breb.) Hilse	+	+
10	<i>Pinnularia intermedia</i> Lagerst.	+	+
11	<i>Hantzschia amphioxys</i> (Ehr.) Grun. in Cleve et Grun.	+	+
<b>Xhantophyta</b>			
12	<i>Bumilleriopsis brevis</i> (Gern.) Printz	+	+
Всего видов / Total number of species		9	12

Примечание: 1 – экспериментальный участок; 2 – контрольный участок; «-» – отсутствие вида.  
Note: 1 – the experimental site, 2 – the control site; “-” – absence of the species.

Таблица 3 / Table 3

Видовое разнообразие альгоцианофлоры в посевах кукурузы  
Species diversity of algocyanoflora in corn crops

№ / No.	Отделы, виды / Groups, species	1	2
<b>Cyanobacteria</b>			
1	<i>Phormidium autumnale</i> (Ag.) Gom.	+	+
2	<i>Leptolyngbya foveolarum</i> (Rabenh. et Gom.) Anagn. et Kom.	–	+
3	<i>L. boryana</i> (Gom.) Anagn. et Kom.	–	+
<b>Chlorophyta</b>			
4	<i>Actinochloris sphaerica</i> Korsch.	–	+
5	<i>Bracteacoccus minor</i> (Chodat) Petrova	–	+
6	<i>Chlorella minutissima</i> Fott et Novakova	+	+
7	<i>C. vulgaris</i> Beijer.	+	+
8	<i>Chlamydomonas gloeogama</i> Korsch. in Pasch.	+	+
9	<i>C. minutissima</i> Korsch. in Pascher	+	+
10	<i>Chlorococcum infusionum</i> (Schrank) Menegh.	+	+
11	<i>Klebsormidium nitens</i> (Menegh. in Kütz.) Lokh.	+	+
12	<i>K. flaccidum</i> (Kütz.) Silva et al.	+	+
13	<i>K. rivulare</i> (Kütz.), comb. nova	–	+
14	<i>Pseudococcomyxa simplex</i> (Mainx) Fott	+	–
15	<i>Tetracystis aggregata</i> Brown et Bold	+	+
<b>Bacillariophyta</b>			
16	<i>Navicula pelliculosa</i> (Breb.) Hilse	+	–
17	<i>Luticola mutica</i> (Kütz.) Mann in Round et al.	+	–
18	<i>Pinnularia intermedia</i> Lagerst.	+	+
19	<i>P. borealis</i> Ehr.	–	+
20	<i>Hantzschia amphioxys</i> (Ehr.) Grun.	+	+
<b>Xanthophyta</b>			
21	<i>Pleurochloris pyrenoidosa</i> Pasch.	–	+
22	<i>Xanthonema exile</i> (Klebs) Silva	–	+
<b>Eustigmatophyta</b>			
23	<i>Eustigmatos magnus</i> (B. Petersen) Hibberd	–	+
Всего видов / Total number of species		13	19

Примечание: 1 – экспериментальный участок; 2 – контрольный участок; «–» – отсутствие вида.  
Note: 1 – the experimental site, 2 – the control site; “–” – absence of the species.

линных почвах региона и в почвах, испытывающих техногенную нагрузку. В поверхностных разрастаниях была отмечена безгетероцистная ЦБ *Phormidium autumnale*, также широко распространённый и толерантный к антропогенной нагрузке вид. На контрольном участке доминантами сообществ являлись зелёные водоросли: *Chlorella minutissima*, *Chlorococcum infusionum*, *Klebsormidium flaccidum*, *K. nitens* и ЦБ *Phormidium autumnale*. Коэффициент Жаккара показывает высокое сходство доминирующих видов в плёнках «цветения» (75%).

При постановке чашечных и водных культур на обоих участках выявлена более разнообразная альгоцианофлора (табл. 3). По числу видов также преобладали зелёные водоросли, при этом не были отмечены азотфиксирующие ЦБ, за-

вершающие сезонную сукцессию на пахотных дерново-подзолистых почвах. Осеннее «цветение» пахотных дерново-подзолистых почв, не подверженных воздействию в качестве удобрения животноводческими стоками, характеризуется массовым развитием ЦБ с доминированием азотфиксирующих видов из родов *Anabaena*, *Cylindrospermum*, *Nostoc*, *Tolypothrix* [25].

Практически, как и 30 лет назад [20], основу современных группировок водорослей составляли виды: *Chlorella minutissima*, *Chlorococcum infusionum*, *Klebsormidium flaccidum*, *K. nitens*, *Xanthonema exile*, *Luticola mutica*, *Hantzschia amphioxys*.

Коэффициент Жаккара экспериментального и контрольного участков составляет 47,8%, что указывает на умеренное сходство альгоцианофлор.

**Заключение**

В пахотных почвах, испытывающих длительное влияние вносимых в качестве удобрения животноводческих стоков, сформировалась группировка видов, основу которой составляют нитчатые и одноклеточные зелёные водоросли, толерантные к высоким дозам азотных удобрений. Отсутствие в составе сообществ микрофототрофов азотфиксирующих цианобактерий, завершающих сезонную сукцессию фототрофных микроорганизмов в пахотных почвах, является индикатором нарушения естественных почвенных процессов.

*Работа выполнена в рамках государственного задания ИБ ФИЦ Коми НЦ УрО РАН по теме «Структура и состояние компонентов техногенных экосистем подзоны южной тайги», номер государственной регистрации в ЕГИСУ № 1220401000325.*

**Литература**

1. Штина Э.А. Почвенные водоросли как экологические индикаторы // Ботанический журнал. 1990. Т. 75. № 4. С. 441–453.
2. Csotonyi J.T., Swiderski J., Stackebrandt E., Yurkov V. A new environment for aerobic anoxygenic phototrophic bacteria: biological soil crusts // Environmental Microbiology Reports. 2010. V. 2. No. 5. P. 651–656.
3. Mukherjee C., Chowdhury R., Ray K. Phosphorus recycling from an unexplored source by polyphosphate accumulating microalgae and cyanobacteria – A step to phosphorus security in agriculture // Frontiers in Microbiology. 2015. V. 6. Article No. 1421.
4. Mutale-Joan C., Sbabou L., Hicham E.A. Microalgae and cyanobacteria: how exploiting these microbial resources can address the underlying challenges related to food sources and sustainable agriculture: a review // Journal of Plant Growth Regulation. 2023. V. 42. No. 1. P. 1–20.
5. Prasanna R., Sood A., Jaiswal P., Nayak S., Gupta V., Chaudhary V., Joshi M., Natarajan C. Rediscovering cyanobacteria as valuable sources of bioactive compounds (review) // Appl. Biochem. Microbiol. 2010. V. 46. No. 2. P. 119–134.
6. Shah S.T., Basit A., Ullah I., Mohamed H.I. Cyanobacteria and algae as biocontrol agents against fungal and bacterial plant pathogens // Plant Growth-Promoting Microbes for Sustainable Biotic and Abiotic Stress Management / Eds. H.I. Mohamed, H.E.-D.S. El-Beltagi, K.A. Abd-Elsalam. Springer, 2021. P. 1–23.
7. Tan C.Y., Dodd I.C., Chen J.E., Phang S.M., Chin C.F., Yow Y.Y., Ratnayeke S. Regulation of algal and cyanobacterial auxin production, physiology, and application in agriculture: an overview // Journal of Applied Phycology. 2021. V. 33. No. 5. P. 2995–3023.

8. Singh H., Khattar J.S., Ahluwalia A.S. Cyanobacteria and agricultural crops // Vegetos. 2014. V. 27. No. 1. P. 37–44.
9. García-Galán M.J., Monllor-Alcaraz L.S., Postigo C., Uggetti E., López de Alda M., Díez-Montero R., García J. Microalgae-based bioremediation of water contaminated by pesticides in peri-urban agricultural areas // Environmental Pollution. 2020. V. 265. Article No. 114579.
10. Gonçalves A.L. The use of microalgae and cyanobacteria in the improvement of agricultural practices: a review on their biofertilising, biostimulating and biopesticide roles // Applied Sciences. 2021. V. 11. No. 2. Article No. 871.
11. Renuka N., Guldhe A., Prasanna R., Singh P., Bux F. Microalgae as multi-functional options in modern agriculture: current trends, prospects and challenges // Biotechnology Advances. 2018. V. 36. No. 4. P. 1255–1273.
12. Dineshkumar R., Kumaravel R., Gopalsamy J., Sikder M.N.A., Sampathkumar P. Microalgae as biofertilizers for rice growth and seed yield productivity // Waste and Biomass Valorization. 2018. V. 9. P. 793–800.
13. Manoharan L., Kushwaha S.K., Ahrén D., Hedlund K. Agricultural land use determines functional genetic diversity of soil microbial communities // Soil Biology and Biochemistry. 2017. V. 115. P. 423–432.
14. Crouzet O., Consentino L., Pétraud J.P., Marraud C., Aguer J.P., Bureau S., Le Bourvellec C., Bérard A. Soil photosynthetic microbial communities mediate aggregate stability: influence of cropping systems and herbicide use in an agricultural soil // Frontiers in Microbiology. 2019. V. 10. Article No. 1319.
15. Chaer G., Fernandes M., Myrold D., Bottomley P. Comparative resistance and resilience of soil microbial communities and enzyme activities in adjacent native forest and agricultural soils // Microbial Ecology. 2009. V. 58. P. 414–424.
16. Пилип Л.В., Сырчина Н.В., Козвонин В.А., Колеватых Е.П., Ашихмина Т.Я., Сазанов А.В. Биологическое загрязнение пахотных земель отходами свиноводства // Теоретическая и прикладная экология. 2022. № 3. С. 199–205.
17. Сырчина Н.В., Пилип Л.В., Ашихмина Т.Я. Химическая деградация земель под воздействием отходов животноводства // Теоретическая и прикладная экология. 2022. № 3. С. 219–225.
18. Пилип Л.В., Сырчина Н.В., Кузнецов Д.А. Животноводческие комплексы как источники загрязнения окружающей среды тяжёлыми металлами (Cu, Zn) // Принципы экологии. 2023. Т. 12. № 1. С. 89–96.
19. Rocca J.D., Simonin M., Blaszcak J.R., Ernakovich J.G., Gibbons S.M., Midani F.S., Washburne A.D. The microbiome stress project: toward a global meta-analysis of environmental stressors and their effects on microbial communities // Frontiers in Microbiology. 2018. V. 9. Article No. 3272.
20. Малышева О.А. Формирование альгогруппировок на почвах, загрязнённых животноводческими

стоками // Микроорганизмы в сельском хозяйстве: Труды докладов IV Всесоюзной научной конференции. Пушино, 1992. С. 123.

21. Beattie R.E., Bandla A., Swarup S., Hristova K.R. Freshwater sediment microbial communities are not resilient to disturbance from agricultural land runoff // *Frontiers in Microbiology*. 2020. V. 11. Article No. 539921.

22. Трухачев В.И., Злыднев Н.З., Злыднева Р.М. Производство и использование органических удобрений // *Вестник АПК Ставрополя*. 2015. № 2. С. 120–131.

23. Штина Э.А., Голлербах М.М. Экология почвенных водорослей. М.: Наука, 1976. 144 с.

24. Домрачева Л.И. «Цветение» почвы и закономерности его развития. Сыктывкар: Коми НЦ УрО РАН, 2005. 336 с.

25. Кондакова Л.В., Кислицына А.П. «Цветение» почвы в вариантах полевого опыта под травосмесями // *Экология родного края: проблемы и пути их решения: материалы XV Всероссийской научно-практической конференции с международным участием*. Книга 2. Киров: Вятский государственный университет, 2020. С. 62–67.

## References

1. Shtina E.A. Soil algae as ecological indicators // *Botanicheskiy Zhurnal*. 1990. V. 75. No. 4. P. 441–453 (in Russian).

2. Csotonyi J.T., Swiderski J., Stackebrandt E., Yurkov V. A new environment for aerobic anoxygenic phototrophic bacteria: biological soil crusts // *Environmental Microbiology Reports*. 2010. V. 2. No. 5. P. 651–656. doi: 10.1111/j.1758-2229.2010.00151.x

3. Mukherjee C., Chowdhury R., Ray K. Phosphorus recycling from an unexplored source by polyphosphate accumulating microalgae and cyanobacteria – A step to phosphorus security in agriculture // *Frontiers in Microbiology*. 2015. V. 6. Article No. 1421. doi: 10.3389/fmicb.2015.01421

4. Mutale-Joan C., Sbabou L., Hicham E.A. Microalgae and cyanobacteria: how exploiting these microbial resources can address the underlying challenges related to food sources and sustainable agriculture: a review // *Journal of Plant Growth Regulation*. 2023. V. 42. No. 1. P. 1–20. doi: 10.1007/s00344-021-10534-9

5. Prasanna R., Sood A., Jaiswal P., Nayak S., Gupta V., Chaudhary V., Joshi M., Natarajan C. Rediscovering cyanobacteria as valuable sources of bioactive compounds (review) // *Appl. Biochem. Microbiol*. 2010. V. 46. No. 2. P. 119–134. doi: 10.1134/S0003683810020018

6. Shah S.T., Basit A., Ullah I., Mohamed H.I. Cyanobacteria and algae as biocontrol agents against fungal and bacterial plant pathogens // *Plant Growth-Promoting Microbes for Sustainable Biotic and Abiotic Stress Management* / Eds. H.I. Mohamed, H.E.-D.S. El-Beltagi, K.A. Abd-Elsalam. Springer, 2021. P. 1–23. doi: 10.1007/978-3-030-66587-6\_1

7. Tan C.Y., Dodd I.C., Chen J.E., Phang S.M., Chin C.F., Yow Y.Y., Ratnayake S. Regulation of algal and cyanobacterial auxin production, physiology, and application in agriculture: an overview // *Journal of Applied Phycology*. 2021. V. 33. No. 5. P. 2995–3023. doi: 10.1007/s10811-021-02475-3

8. Singh H., Khattar J.S., Ahluwalia A.S. Cyanobacteria and agricultural crops // *Vegetos*. 2014. V. 27. No. 1. P. 37–44. doi: 10.5958/j.2229-4473.27.1.008

9. García-Galán M.J., Monllor-Alcaraz L.S., Postigo C., Uggetti E., López de Alda M., Díez-Montero R., García J. Microalgae-based bioremediation of water contaminated by pesticides in peri-urban agricultural areas // *Environmental Pollution*. 2020. V. 265. Article No. 114579. doi: 10.1016/j.envpol.2020.114579

10. Gonçalves A.L. The use of microalgae and cyanobacteria in the improvement of agricultural practices: a review on their biofertilising, biostimulating and biopesticide roles // *Applied Sciences*. 2021. V. 11. No. 2. Article No. 871. doi: 10.3390/app11020871

11. Renuka N., Guldhe A., Prasanna R., Singh P., Bux F. Microalgae as multi-functional options in modern agriculture: current trends, prospects and challenges // *Biotechnology Advances*. 2018. V. 36. No. 4. P. 1255–1273. doi: 10.1016/j.biotechadv.2018.04.004

12. Dineshkumar R., Kumaravel R., Gopalsamy J., Sikder M.N.A., Sampathkumar P. Microalgae as biofertilizers for rice growth and seed yield productivity // *Waste and Biomass Valorization*. 2018. V. 9. P. 793–800. doi: 10.1007/s12649-017-9873-5

13. Manoharan L., Kushwaha S.K., Ahrén D., Hedlund K. Agricultural land use determines functional genetic diversity of soil microbial communities // *Soil Biology and Biochemistry*. 2017. V. 115. P. 423–432. doi: 10.1016/j.soilbio.2017.09.011

14. Crouzet O., Consentino L., Pêtraud J.P., Marraud C., Aguer J.P., Bureau S., Le Bourvellec C., Bérard A. Soil photosynthetic microbial communities mediate aggregate stability: influence of cropping systems and herbicide use in an agricultural soil // *Frontiers in Microbiology*. 2019. V. 10. Article No. 1319. doi: 10.3389/fmicb.2019.01319

15. Chaer G., Fernandes M., Myrold D., Bottomley P. Comparative resistance and resilience of soil microbial communities and enzyme activities in adjacent native forest and agricultural soils // *Microbial Ecology*. 2009. V. 58. P. 414–424. doi: 10.1007/s00248-009-9508-x

16. Pilip L.V., Syrchina N.V., Kozvonin V.A., Kolveatykh E.P., Ashikhmina T.Ya., Sazanov A.V. Biological pollution of plough soils with pig-breeding wastes // *Theoretical and Applied Ecology*. 2022. No. 3. P. 199–205 (in Russian). doi: 10.25750/1995-4301-2022-3-199-205

17. Syrchina N.V., Pilip L.V., Ashikhmina T.Ya. Chemical degradation of soil under the impact of farm animal waste // *Theoretical and Applied Ecology*. 2022. No. 3. P. 219–225 (in Russian). doi: 10.25750/1995-4301-2022-3-219-225

18. Pilip L.V., Syrchina N.V., Kuznetsov D.A. Livestock breeding complexes as a sources of pollution of the environment with heavy metals (Cu, Zn) // *Ecology Principles*. 2023. V. 12. No. 1. P. 89–96 (in Russian). doi: 10.15393/j1.art.2023.13182
19. Rocca J.D., Simonin M., Blaszcak J.R., Ernakovich J.G., Gibbons S.M., Midani F.S., Washburne A.D. The microbiome stress project: toward a global meta-analysis of environmental stressors and their effects on microbial communities // *Frontiers in Microbiology*. 2018. V. 9. Article No. 3272. doi: 10.3389/fmicb.2018.03272
20. Malysheva O.A. Formation of algo-groups in soils polluted with liquid farm animal wastes // *Microorganisms in agriculture: Doklady IV Vsesoyuznoy nauchnoy konferencii*. 1992. P. 123 (in Russian).
21. Beattie R.E., Bandla A., Swarup S., Hristova K.R. Freshwater sediment microbial communities are not resilient to disturbance from agricultural land runoff // *Frontiers in Microbiology*. 2020. V. 11. Article No. 539921. doi: 10.3389/fmicb.2020.539921
22. Trukhachev V.I., Zlydnev N.Z., Zlydneva R.M. Production and use of organic fertilizers // *Agricultural Bulletin of Stavropol Region*. 2015. No. 2. P. 120–131 (in Russian).
23. Shtina E.A., Gollerbach M.M. *Soil algae ecology*. Moskva: Nauka, 1976. 144 p. (in Russian).
24. Domracheva L.I. *Soil “blooming” and the laws of its development*. Syktyvkar: Komi NTs UrO RAN, 2005. 336 p. (in Russian).
25. Kondakova L.V., Kislitsyna A.P. Soil “blooming” in variants of a field experiment under grass mixtures // *Ecology of the native land: problems and ways of their solving: Materyaly XV Vserossiyskoy s mezhdunarodnym uchastiem nauchno-prakticheskoy konferentsii*. 2020. P. 62–67 (in Russian).

## Рациональное лесопользование в России: проблемы и перспективы совершенствования организационно-правового механизма

© 2023. Д. Г. Домрачев, к. ю. н., доцент, зав. кафедрой,  
А. А. Кирилловых, к. ю. н., доцент, В. Н. Пугач, к. э. н., ректор,  
Вятский государственный университет,  
610000, Россия, г. Киров, ул. Московская, д. 36,  
e-mail: zentr-pravo@mail.ru, kirillovykh2014@yandex.ru

Решение проблемы сохранения лесов на планете зависит от усилий всего мирового сообщества. Важное место в этом вопросе отводится правовым механизмам, закрепляющим взаимные обязательства государств, а также нормы внутреннего законодательства по обеспечению устойчивого развития лесов и лесного хозяйства. В статье проведён анализ современного состояния и практики реализации международно-правового режима, а также положений отечественного лесного законодательства в части организационного и правового обеспечения повышения эффективности хозяйственного использования лесов на территории Российской Федерации. Показаны проблемы и перспективы реализации отдельных регулятивных инструментов, обеспечивающих проведение Российской Федерацией государственной политики в сфере развития лесного хозяйства. В частности, обосновывается решающая роль государства в выстраивании механизмов рационализации использования лесов с учётом применения комплекса (административных и экономических) мер стимулирования хозяйствующих субъектов. Необходим переход от ресурсо-ориентированного к экосистемному подходу в развитии лесной экономики, позволяющему гармонизировать интересы государства, общества и бизнеса в использовании лесных ресурсов при сохранении приемлемых темпов социально-экономического развития страны.

**Ключевые слова:** правовой механизм, государственное регулирование, рациональное лесопользование, лесное хозяйство, экологическая функция, аренда лесных участков.

## Rational forest management in Russia: problems and prospects of improving the organizational and legal mechanism

© 2023. D. G. Domrachev ORCID: 0000-0002-7967-9129<sup>†</sup>  
A. A. Kirillovykh ORCID: 0000-0002-0035-9035<sup>†</sup>  
V. N. Pugach ORCID: 0000-0003-1220-4062<sup>†</sup>  
Vyatka State University,

36, Moskovskaya St., Kirov, Russia, 610000,  
e-mail: zentr-pravo@mail.ru, kirillovykh2014@yandex.ru

The solution to the problem of preserving forests on the planet depends on the efforts of the entire world community. An important place in this issue is given to legal mechanisms that consolidate the mutual obligations of states, as well as the norms of domestic legislation to ensure the sustainable development of forests and forestry. The article analyzes the current state and practice of implementing the international legal regime, as well as the provisions of domestic forest legislation in terms of organizational and legal support for improving the efficiency of economic use of forests on the territory of the Russian Federation. The problems and prospects of the implementation of certain regulatory instruments that ensure the implementation by the Russian Federation of state policy in the field of forestry development are shown. In particular, the author substantiates the decisive role of the state in building mechanisms for rationalizing the use of forests, taking into account the use of a set of administrative and economic incentive measures for economic entities. It is necessary to move from a resource-oriented approach to an ecosystem one in the development of the forest economy, allowing to harmonize the interests of the state, society and business in the use of forest resources while maintaining acceptable rates of socio-economic development of the country.

**Keywords:** legal mechanism, state regulation, rational forest management, forestry, ecological function, lease of forest plots.



Лес – важнейшее связующее звено компонентов окружающей природной среды. Леса называют «лёгкими планеты», поскольку они вырабатывают кислород и поглощают углекислый газ. Лес восстанавливает и стабилизирует экологическое равновесие в природе, может быть использован для охраны и улучшения окружающей среды. В то же время, лес – это глобальный фактор обеспечения устойчивого развития человечества и экологической безопасности его жизнедеятельности [1]. Лес во всём многообразии его природных и хозяйственных проявлений является основным объектом экономики лесного хозяйства. Как особый вид биогеоценоза в экономическом отношении лес представляет совокупность ресурсов (земли, древесного запаса, ресурсов побочного пользования, защитных свойств и др.), каждый из которых является источником потребительных стоимостей [2].

С позиции лесного законодательства лес рассматривается как экологическая система или природный ресурс [3]. В документах по стандартизации под лесом понимается целостная совокупность лесных древесных и иных растений, земли, животных, микроорганизмов и других природных компонентов, находящихся во взаимосвязи с внутренней и внешней средой [4].

Леса, в том числе посаженные людьми, покрывают около трети поверхности суши. Площадь их немногим более 40 млн км<sup>2</sup>. Это широкий пояс тайги в Северном полушарии, смешанные и лиственные леса умеренного пояса, вечнозелёные субтропические и тропические леса. На планете 30% хвойных и 70% лиственных лесов.

В соответствии с данными федеральной статистической отчётности, площадь земель лесного фонда в России на 1 января 2022 г. составила 1127915,4 тыс. га. Лесные площади и земли под лесными насаждениями занимали в 2021 г. 896982,8 тыс. га, из них лесные площади составили 870738,0 тыс. га. Лесные площади включают лесные и нелесные земли, относящиеся к категории земель лесного фонда, а также земельные участки, покрытые лесом и не покрытые лесом, расположенные на землях других категорий. Покрытые лесом земли – это лесные площади, занятые древесной, кустарниковой растительностью с полной насаждения от 0,3 до 1 [5].

В рамках Концепции перехода к устойчивому развитию [6] одной из целей государства является постепенное восстановление есте-

ственных экосистем до уровня, гарантирующего стабильность окружающей среды.

Реализация концепции «Устойчивого развития» всецело зависит от согласования конфликтующих интересов государства, производителей и потребителей. Экономический рост, социальная направленность бизнеса вступает в противоречие с необходимостью поддержания экологических систем и сохранения окружающей среды для будущих поколений [7].

Понятие «устойчивое развитие» (sustainable development) имеет широкое содержание и, например, в Договоре о Европейском союзе рассматривается как «сбалансированный экономический рост и стабильность цен, высококонкурентная социальная рыночная экономика, нацеленная на полную занятость и социальный прогресс, а также высокий уровень защиты и улучшения качества окружающей среды» [8].

В феврале 1995 г. на межгосударственном уровне (Декларация Сантьяго, Чили) был одобрен разработанный набор критериев и показателей для сохранения лесов и устойчивого управления лесами. Рациональное использование всех видов лесов соответствует принципам лесопользования и Повестки дня на XXI век, принятой на Конференции ООН по окружающей среде и развитию (в Рио-де-Жанейро) и играет важную роль практической реализации Конвенций ООН по биологическому разнообразию, изменению климата и опустыниванию.

Переход к устойчивому развитию настоятельно требует значительной переработки отечественного законодательства, в том числе касающегося регулирования вопросов рационального лесопользования, в целях его гармонизации с положениями Декларации «Преобразование нашего мира: Повестка дня в области устойчивого развития на период до 2030 года» [9]. Отметим, что в этом направлении нашим государством уже предпринимаются определённые шаги. Так, распоряжением Правительства РФ [10] утверждены цели и основные направления устойчивого (в том числе «зелёного») развития Российской Федерации (РФ). Среди приоритетных направлений решения основных задач в области обеспечения экологической безопасности является реализация эффективных мер по сохранению и рациональному использованию лесных ресурсов [11].

Современная экологическая стратегия перекладывает реализацию защитных и охра-

нительных механизмов на предпринимателей, вызывая тем самым, значительные противоречия в бизнес-сообществе относительно решения вопроса о возможности реализации этой обязанности в действующих экономических реалиях. При этом предпринимательская деятельность в сфере природопользования должна иметь экосистемный подход, связывающий использование природного ресурса с обязанностью по недопущению нанесения ущерба экологическим интересам государства. Необходим переход от ресурсо-ориентированного подхода к экосистемному и в развитии лесной экономики, включая лесоклиматические проекты [12] и механизм лесной рекультивации [13–15].

Основные направления деятельности государства по обеспечению развития лесного хозяйства на период до 2030 г. определяют «Основы государственной политики в области использования, охраны, защиты и воспроизводства лесов в Российской Федерации» [16] и Стратегия развития лесного комплекса Российской Федерации [17].

Государственное управление лесным хозяйством предполагает организационно-правовую деятельность уполномоченных органов публичной власти по регулированию целого комплекса мероприятий, обеспечивающих достижение запланированных целей реализации государственной политики в лесной отрасли [18]. Устойчивое лесное хозяйство означает содержание и использование лесов, когда сохраняется их биоразнообразие, продуктивность, регенерационная способность, жизнеспособность [2].

Лесное хозяйство является составным элементом лесного комплекса России наряду с лесной промышленностью, и включает в себя деятельность по воспроизводству лесов и их охране. Наряду с охраной и использованием, защитой и воспроизводством лесов, в сфере государственной политики предлагается включить развитие лесного комплекса [19].

В системе лесного хозяйства промышленное освоение и воспроизводство лесов строится на основе государственно-частного партнёрства, обусловленного рыночной экономикой, децентрализацией лесопользования и развития предпринимательства в лесной отрасли [20]. Децентрализация системы управления лесным хозяйством обеспечивает региональные особенности лесного комплекса с учётом специфики социально-экономического развития конкретной территории [21].

При этом в рамках развития лесного комплекса важно обеспечить согласование

экономических интересов государства и бизнеса, повысить привлекательность предпринимательской деятельности в сфере лесного хозяйства. Попутно государство пытается обеспечить социально-экономические выгоды от сферы лесопользования, в том числе решить проблемы с увеличением доходов бюджета, обеспечить занятость в лесной отрасли, а также улучшить функциональную составляющую лесов [22].

Действующее лесное законодательство имеет по большей мере ресурсную направленность, поскольку достаточно значительное количество статей Лесного кодекса РФ посвящено вопросам лесопользования. Соответственно, управление лесным комплексом опирается на ресурсный подход, обеспечивающий доходность лесной отрасли посредством проведения лесохозяйственных работ. При этом экосистемные функции лесов как инструмент экологизации оказываются вне поля зрения государственных интересов. Устойчивое лесопользование в России должно обеспечить синергетический эффект, определяющий рост лесной экономики, социальную и экологическую безопасность государства.

В отличие от России, опыт рационального лесопользования в странах Скандинавии (в частности, Финляндии, Швеции, Норвегии) опирается на модель интенсивного выращивания лесов при эффективном уходе за новыми насаждениями. При этом финансирование затрат по лесовосстановлению осуществляется за счёт средств Лесного целевого фонда, формируемого за счёт отчислений лесопользователями части своей прибыли [21, 22]. Повышение эффективности лесопользования в Канаде и США обеспечивается за счёт долгосрочной аренды и контрактной системы лесохозяйственного производства [23, 24]. Одновременно обеспечиваются материальные и рекреационные потребности местного населения, проживающего в лесных районах, что в целом обеспечивает сочетание публичных и частных интересов, экосистемность в лесопользовании.

Важным в достижении общих целей повышения эффективности лесного хозяйства РФ является формирование организационно-правового механизма управления устойчивым развитием лесов, и, прежде всего, обеспечение рационального лесопользования в условиях потребности достижения баланса интересов государства, общества и бизнеса [22, 25]. В этой связи целью исследования является изучение российского и зарубежно-

го опыта практической реализации в рамках действующей государственной лесной политики механизмов, способствующих достижению целей устойчивого развития лесного хозяйства.

### Объект и методы исследования

Объектом настоящего исследования являются общественные отношения в области обеспечения рационального лесопользования. Предмет исследования составляет совокупность правовых норм, принципов и механизмов международно-правового регулирования обеспечения политики в отношении устойчивого управления лесами, а также российского законодательства, определения роли и основных (концептуальных) направлений стратегического развития государства по повышению эффективности лесопользования с учётом обеспечения экологической и экономической безопасности.

Методологическую основу исследования составили аналитический метод, позволяющий рассмотреть практику регламентации вопросов организации рационального лесопользования на международном и национальном уровнях, формально-юридический метод, позволяющий раскрыть системные связи в правовом регулировании, регулятивные особенности правовых актов, правоприменительную практику в России и за рубежом. В качестве эмпирической основы исследования использованы международно-правовые акты, российское законодательство, доктринальные позиции и прикладные положения (выводы), изложенные в научных источниках.

В числе информационных источников настоящего исследования использованы отчёты, статистические материалы и доклады международных организаций, национальных органов власти, а также аналитические отчёты, монографии, научные статьи и материалы конференций по вопросам устойчивого использования, охраны и защиты лесов, представленные на официальных сайтах в сети Интернет. Подбор информационных материалов осуществлялся по ключевым словам в библиографических базах данных научного цитирования Web of Science Core Collection (Clarivate) и eLIBRARY.RU. Поиск материалов проводили по ключевым словам в поисковой системе «Яндекс», в информационных справочно-правовых системах (Консультант-Плюс, Гарант). Охвачен временной период с 1995 г. до настоящего времени.

### Лесоустройство как основа рационального лесопользования

Рациональное использование природных ресурсов предполагает учёт возможностей окружающей среды, возможные риски возникновения опасных для её существования перегрузок [26]. Лесопользование как вид предпринимательской деятельности включает в себя экономическую, экологическую и социальную цели, обеспечивая тем самым комплексный публично значимый эффект.

Рациональное использование лесов может стать и целью лесопользования, и элементом его механизма, поэтому в понятие рациональное лесопользование включается лесоустройство, лесная экономика, лесное планирование и лесоуправление [27].

Проведение лесоустроительных мероприятий является важным элементом государственного управления лесами, в том числе повышения эффективности их использования. При этом порядка 40% лесов к настоящему времени имеют давность лесоустройства более 10 лет. На значительной части территорий, находящихся под лесными угодьями, лесоустройство не проводилось вообще. Отсутствие достоверной и полной информации о количественном и качественном состоянии лесов является системной проблемой в лесоправлении, ведёт к несоблюдению интересов и прав субъектов лесных отношений, прежде всего государства и лесных бизнес-структур.

Для реализации продуманной государственной политики в сфере лесопользования необходима государственная инвентаризация лесов (ГИЛ), позволяющая определить их количественные и качественные характеристики в целях разработки дальнейшей стратегии развития лесного комплекса страны. Таксация лесов является частью лесного планирования и лесоуправления.

К сожалению, передача на региональный уровень полномочий по осуществлению лесоустройства и ведению государственного лесного реестра не привела в этой сфере к положительным изменениям, прежде всего, в силу отсутствия у региональных властей необходимых ресурсов для реализации соответствующих мероприятий.

Лесное законодательство в настоящее время не содержит норм об обязательности лесоустроительных работ для целей ведения лесного хозяйства, что нельзя считать правильным. Между тем требуется изменение самой системы лесоустроительных отношений,

обеспечения активной роли в ней государства. В целом, предложение по передаче полномочий проведения лесоустройства на землях лесного фонда на федеральный уровень заслуживает внимания [28]. В таком случае будет обеспечена системность в решении проблемы определения качественно-количественного состава лесов на соответствующей территории, включая централизованное финансирование лесоустроительных работ и выбор эффективных исполнителей.

Как отмечено выше, в большинстве случаев давность материалов таксации составляет более 10 лет, что естественно, не отражает объективную картину состояния лесных участков.

Минприроды РФ установлена периодичность проведения таксации лесов – 1 раз в 10 лет [29]. Однако вполне очевидно, что для актуализации материалов лесопользования необходимо проводить таксацию гораздо чаще.

Количественные и качественные характеристики лесных ресурсов могут меняться в процессе их использования, воспроизводства и естественного возобновления, в зависимости от географических и природно-климатических условий на различных лесных участках (в лесах) с разной интенсивностью и этот процесс не может заранее соответствовать определённой, установленной нормативно-правовым актом цикличности (10, 15, 20 лет).

Своевременная и регулярная таксация лесов позволяет получить объективную лесоустроительную информацию в части запасов древесины и её возрастного распределения [30]. В связи с этим, в целях осуществления рационального лесопользования, в том числе получения государством максимальной экономической выгоды, необходимо пересмотреть действующие нормы лесного законодательства (в частности п. 31 Лесоустроительной инструкции), предусмотрев возможность проведения таксации лесов и с большей периодичностью, при наличии соответствующих оснований – изменения количественных и качественных характеристик лесных участков.

В конечном счёте наличие такой информации будет отражать эксплуатационные перспективы лесов и, соответственно, уровень их инвестиционной привлекательности для бизнеса. В свою очередь, разработка проекта освоения лесов в случаях, предусмотренных ст. 88 ЛК РФ, по неактуальным (устаревшим) материалам таксации может привести к нарушениям требований ст. 12 ЛК РФ (освоение лесов) и причинению существенного экологического и материального ущерба государству.

### **Инвестиционная активность в сфере лесопользования: правовые формы и меры стимулирования**

Повышение доходности лесной отрасли является одним из ключевых интересов государства. Как известно, лесопользование на землях федерального назначения осуществляется частным бизнесом в рамках арендных отношений. При этом, бизнес остро нуждается в мерах государственной поддержки, позволяющих обеспечивать техническое перевооружение, обновлять производственные мощности для целей модернизации лесохозяйственного производства. От решения этих задач зависит уровень занятости (обеспеченности кадрами) в лесном секторе, и как следствие, снижение социальной напряжённости в сельской местности.

В связи с активным лесопользованием доступные для освоения лесные ресурсы в настоящее время существенно ограничены. Можно обнаружить растущий спрос на аренду лесных участков, который существенно опережает их предложение [31].

Заключение договоров аренды лесных участков осуществляется на основании торгов, как правило, по результатам аукционов (ст. 78–82.2 ЛК РФ). С точки зрения развития арендных отношений владение актуальными лесоустроительными данными сделает их более стабильными, исключит возможные будущие споры арендаторов относительно фактического объёма лесозаготовительного материала.

Расчётная лесосека должна отражать объективное состояние дел на конкретном лесном участке в части видового разнообразия пород древостоя, а также их количественного состава. В этой части необходимо проведение мероприятий комплексного характера, включая не только лесоустройство, но также ведение государственного лесного реестра и специальные обследования лесов [31]. При этом расчётная лесосека в свете современного лесного законодательства является нормативом более экологическим, чем хозяйственным (имущественным), выступает объектом лесного планирования, государственной экспертизы оценки негативного воздействия на окружающую среду и имущественных отношений [32].

Полное освоение расчётной лесосеки позволяет выстраивать эффективное взаимодействие с лесными питомниками, обеспечивая деятельность по лесовосстановлению необходимым посадочным материалом.

В некоторых случаях расчётная лесосека не осваивается арендаторами умышленно, с целью создания искусственного дефицита древесины либо передачи лесного участка в фактическую субаренду [33]. В качестве административного инструмента борьбы с такими фактами предлагается вносить в договор аренды специальные условия о внесудебном порядке расторжения договора при несоблюдении темпов и объёма освоения расчётной лесосеки. С другой стороны, превышение установленного лимита вырубki лесных насаждений приводит к нарушению лесной экосистемы, дисбалансу количественного и качественного состава лесов. В этой связи, целесообразно также ввести и осуществлять на постоянной основе мониторинг полноты освоения расчётной лесосеки как на уровне государства, так и субъекта РФ и конкретного арендатора лесного участка в частности.

Рыночные начала, стимулирующие к повышению доходов государства от использования лесов, не в полной мере отражены в нормах лесного законодательства. Следует особо подчеркнуть, что согласно ст. 73 ЛК РФ размер арендной платы в договоре аренды лесного участка определяется по установленному отпуску древесины, а не по фактическому объёму её заготовки.

Лесное законодательство не допускает пересмотр объёма заготовки древесины даже в случаях изменения его фактических показателей или отказа арендатора от части площадей арендованного участка. Надзорные органы (прокуратура) неоднократно признавали незаконными факты изменения по соглашению сторон условий (прежде всего, в части снижения арендной платы) договоров аренды лесного участка, что впоследствии подтверждала и судебная практика. В результате многие арендаторы были вынуждены нести существенные финансовые издержки, внося арендную плату за фактически несуществующий объём древесины [34].

Впоследствии, в результате внесения изменений в ст. 74 и 83 ЛК РФ, единственным вариантом решения этой проблемы стало право арендатора лесного участка на обращение в арбитражный суд для урегулирования соответствующих правоотношений с арендодателем. В частности, в порядке ч. 3 ст. 74.1 ЛК РФ договор аренды мог быть изменён по решению суда в случае существенного изменения количественных и качественных характеристик такого лесного участка (т. е. по результатам уточнения состояния лесных

ресурсов путём составления арендатором проекта освоения лесов).

Однако реализация этой возможности была фактически парализована правилом о периодичности проведения таксации лесов – 1 раз в 10 лет. Арендаторы, заключившие договоры аренды лесных участков по результатам торгов, лишились права самостоятельно (путём привлечения специализированных организаций), за свой счёт проводить таксацию лесов на этих участках для уточнения объёмов запаса и ассортимента древесины, если к этому времени ещё не истёк срок действия предыдущей таксации, т. е. 10 лет.

В результате, в многочисленных случаях, когда предыдущая таксация была сделана поверхностно, некачественно и не отражала реального положения дел на лесном участке, и в случаях существенных изменений запаса древесины и её породного состава в результате заготовки древесины предыдущим арендатором, новый арендатор лишался возможности исправить ситуацию путём проведения новой таксации, уточнения запасов и ассортимента древесины и внесения изменений в соответствующие документы.

В свою очередь, это привело к ситуации, когда многие арендаторы, законно получив право заготовки древесины, фактически лишились возможности её осуществлять в тех объёмах и по тем видам пород, которые предусмотрены договором аренды и, соответственно, получения той прибыли, на которую они рассчитывали, приобретая право аренды лесного участка. Не имея гарантий последующей доходности, пользователи отказывались от аренды и освоения участка.

Вполне очевидно, что отсюда возникают пагубные последствия для развития всей лесной отрасли. Отказ от аренды ведёт к нарушению всего технологического цикла освоения лесного участка (своевременное проведение лесохозяйственных и лесовосстановительных работ, рубок спелых и перестойных насаждений и т. д.) и, соответственно, не позволяет решать основную задачу правового регулирования лесопользования – обеспечение многоцелевого, рационального, непрерывного, неистощительного использования лесов для удовлетворения потребностей общества в лесах и лесных ресурсах (ст. 1, ст. 25 ЛК РФ).

Однако наиболее острой с точки зрения повышения эффективности лесопользования проблемой являются трудности в обеспечении именно многоцелевого использования лесов, что предполагает осуществление хо-

зяйственной деятельности на одном лесном участке несколькими предпринимателями. Совместное освоение лесных ресурсов становится затруднительным по причинам организационно-правового характера, исключающего возможность заключения нескольких договоров аренды в отношении одного и того же лесного участка [35]. Хотя высшие судебные инстанции, опираясь на положения ст. 25 ЛК РФ, такую возможность в принципе не исключают.

В лесном законодательстве отсутствуют положения о возможности в рамках многоцелевого лесопользования предоставления одного участка нескольким пользователям под различные цели. Такое положение также ведёт к снижению инвестиционной привлекательности отрасли лесного хозяйства.

Кроме того, в целях решения проблем эффективности лесопользования также представляется разумным передавать право на использование лесного участка в конкурсном порядке, предусматривающем для претендента различные критерии соответствия условиям конкурса как технологического (рациональное использование древесины), так и социально-экономического (занятость населения, строительство дорог, иной инфраструктуры) характера.

### **Механизм воспроизводства лесов: проблемы повышения эффективности**

Практика показывает, что сложившийся подход к освоению арендаторами лесных участков негативно влияет на состояние лесного фонда, значительно ухудшает его структуру, а также почвенный слой лесных участков [36]. Как правило, арендаторами изымаются наиболее ценные породы лесных насаждений с одновременным накоплением низкобонитетных древостоев. Во многом такой ситуации способствует механизм определения ставок арендной платы, рассчитываемой за норму заготовки древесины, а не фактический её объём [37].

Одним из направлений рационализации лесопользования является изменение подхода к расчёту арендной платы и определение её размера в зависимости от товарно-сортиментной структуры вырубаемых насаждений, поскольку в ряде случаев при внесении изменений в договор аренды расчёт арендной платы производился арендодателем без учёта, например, фактических изменений породного состава лесных насаждений на арендуемом участке.

Рациональному использованию лесов способствуют лесовосстановление и лесоразведение, актуальная информация о лесовосстановительных мероприятиях [38]. Являясь возобновляемым ресурсом, лес должен отвечать не только количественным, но и качественным характеристикам, обеспечивающим его продуктивность, товарность, средообразующие функции [20]. Также целесообразно обеспечить вывод санитарных рубок из установленного ежегодного объёма заготовки древесины на арендуемых лесных участках.

При этом представляется необходимым исключить из хозяйственного использования леса, являющиеся в силу различных факторов (рельеф местности, удалённость от транспортных путей и т. п.) малодоступными, сохранив за ними средообразующие, почвозащитные, водоохранные, рекреационные функции.

Основой устойчивого развития в сфере лесного хозяйства является рациональное лесопользование, предполагающее проведение лесовосстановления, а также создание умеренной нагрузки на экосистему [39]. В большинстве случаев у арендатора отсутствует экономическая заинтересованность в проведении качественных лесовосстановительных работ. Используется низкосортный посадочный материал, приводящий к гибели лесных культур, ухудшению качества лесного фонда страны [20]. В результате снижается производственный потенциал леса, а интенсивная заготовка древесины в ряде регионов ведёт к истощению лесных угодий, снижению защитных функций лесов.

Учитывая растущую значимость сохранения лесов, следует признать выращивание посадочного материала частью технологии лесовосстановления. В связи с этим, проблема по воспроизводству лесов выходит за рамки договорных отношений, и её решение должно опираться на механизм государственного участия в этой деятельности. Соответственно, необходимо установление порядка финансирования и определения субъектов, обеспечивающих проведение работ по воспроизводству лесов при нарушении в этой части арендаторами своих договорных обязательств.

Практика проводимых в 2022 г. Федеральным агентством лесного хозяйства РФ контрольно-надзорных мероприятий по выполнению условий договоров аренды выявила серьёзные проблемы в лесозаготовительной отрасли. Нарушения положений договоров аренды лесных участков в части лесовосстановительных мероприятий со стороны арендато-

ров получили системный характер. Из общей массы нарушений максимальное их количество (28%) приходится на невыполнение заявленных мероприятий по охране, защите и воспроизводству лесов. Причём наибольшее количество расторгнутых по этой причине договоров (23) приходится на Кировскую область [40].

Примером рационализации в части стимулирования экологичности лесного хозяйства является практика ряда регионов (Белгородская, Воронежская, Курская, Липецкая, Тамбовская области) по созданию Фондов экономической мотивации лесопользователей. В современных условиях хозяйствования наиболее действенными способами достижения целей лесопользования являются экономические стимулы, увязанные с финансовыми интересами лесозаготовителей. Существенной мерой могут стать предоставление льгот в сфере налогообложения, субсидирование части затрат по лизингу производственного оборудования. Поэтому в систему управления лесами должен быть органично включён механизм финансовой поддержки лесного бизнеса.

### Заключение

В рамках настоящей статьи решены следующие задачи: установлены проблемы вовлечения лесов в хозяйственное использование, определены основные перспективы развития рационального лесопользования в условиях реализации модели государственно-частного партнёрства в лесных отношениях; предложены конкретные меры по совершенствованию организационно-правового механизма рационализации лесопользования.

С учётом изложенного, организационно-правовой механизм рационализации лесопользования на современном этапе требует совершенствования нормативно-правовой базы и полномочий органов государственной власти в части обеспечения государственной политики развития лесного хозяйства.

В связи с чем важно реализовать ряд мероприятий по совершенствованию данного механизма.

1. В части правового регулирования предлагаем закрепить в Лесном кодексе РФ следующие положения:

1) перечень условий и обстоятельств, при которых изменения в договор аренды лесного участка могут быть внесены по решению сторон (т. е. без судебного решения). Прежде всего, сюда следует отнести условие о цене (увеличение/уменьшение) договора в случае

изменения данных об объёме заготовительных лесных ресурсов на участке, полученных по результатам таксации (лесоустройства);

2) перечень оснований для досрочного расторжения договора аренды (в том числе во внесудебном порядке) со стороны арендодателя. В первую очередь, таким основанием может быть невыполнение арендатором своих инвестиционных обязательств;

3) возможность заключения в отношении одного участка нескольких договоров аренды при условии его многоцелевого использования.

2. В части совершенствования организации порядка управления лесопользованием необходимо реализовать следующие мероприятия:

1) передать полномочия по проведению лесосустройства на землях лесного фонда с уровня субъектов РФ на федеральный уровень с определением порядка несения финансовых затрат по проведению соответствующих мероприятий;

2) установить конкурсный порядок передачи лесных участков в аренду, как наиболее отвечающий требованиям рационального лесопользования (эффективное решение вопросов занятости, развития инфраструктуры населённых пунктов, лесовоспроизводства);

3) установить порядок финансирования и определения субъектов, обеспечивающих проведение работ по воспроизводству лесов при нарушении в этой части арендаторами своих договорных обязательств.

### Литература

1. Ключанова Л.Г. Устойчивое управление лесами как основной принцип ведения лесного хозяйства в Российской Федерации // Управленческое консультирование. 2015. № 1. С. 17–28.
2. Мясников А.Г., Данченко М.А. Теоретические основы рационального лесопользования // Вестник Томского государственного университета. 2012. № 356. С. 167–170.
3. Лесной кодекс Российской Федерации от 04.12.2006 г. № 200-ФЗ (ред. от 29.12.2022) // Собрание законодательства РФ. 2006. № 50. Ст. 5278.
4. Приказ Рослесхоза от 03.12.1998 г. № 203 «Об утверждении отраслевого стандарта ОСТ 56-108-98 «Лесоводство. Термины и определения» [Электронный ресурс] [https://e-ecolog.ru/docs/VTbuUD96CkxPiwVA\\_NhFWw?ysclid=leocmt8e71241953748](https://e-ecolog.ru/docs/VTbuUD96CkxPiwVA_NhFWw?ysclid=leocmt8e71241953748) (Дата обращения: 28.02.2023).
5. Государственный (национальный) доклад о состоянии и использовании земель в Российской Федерации в 2021 году. М.: Росреестр, 2022. 206 с.

6. Указ Президента РФ от 01.04.1996 г. № 440 «О Концепции перехода Российской Федерации к устойчивому развитию» // Собрание законодательства Российской Федерации. 1996. № 15. Ст. 1572.
7. Андреева Л.В. Переход к устойчивому развитию в условиях цифровой трансформации в России: правовой аспект // Право и цифровая экономика. 2022. № 1. С. 14–21.
8. Договор о Европейском Союзе (Подписан в г. Маастрихте 07.02.1992). Официальный сайт законодательства Европейского Союза [Электронный ресурс] <http://eur-lex.europa.eu/> (Дата обращения: 28.02.2023).
9. Декларация «Преобразование нашего мира: Повестка дня в области устойчивого развития на период до 2030 года», принятая Резолюцией Генеральной Ассамблеи Организации Объединённых Наций от 25 сентября 2015 г. [Электронный ресурс] [https://unctad.org/system/files/official-document/ares70d1\\_ru.pdf](https://unctad.org/system/files/official-document/ares70d1_ru.pdf) (Дата обращения: 12.02.2023).
10. Распоряжение Правительства РФ от 14.07.2021 № 1912-р «Об утверждении целей и основных направлений устойчивого (в том числе зеленого) развития Российской Федерации» // Собрание законодательства Российской Федерации. 2021. № 30. Ст. 5814.
11. Указ Президента РФ от 19.04.2017 № 176 «О Стратегии экологической безопасности Российской Федерации на период до 2025 года» // Собрание законодательства Российской Федерации. 2017. № 17. Ст. 2546.
12. Гордеева Е.М., Ведерникова И.Е. Лесоклиматические проекты в России: актуальное правовое обеспечение // Теоретическая и прикладная экология. 2022. № 2. С. 209–215.
13. Лелекова Е.В., Коновалова И.А. Состояние лесного фитоценоза после рубки ухода с нарушением технологии // Теоретическая и прикладная экология. 2022. № 1. С. 56–63.
14. Лучникова Е.М., Ильашенко В.Б., Ковалевский А.В., Гашков С.И., Воронина Л.А., Зубко К.С., Филиппова А.В. Влияние различных способов лесной рекультивации на восстановление сообщества млекопитающих черневой тайги // Теоретическая и прикладная экология. 2022. № 3. С. 183–191.
15. Скугорева С.Г., Трефилова Л.В., Домрачева Л.И., Кантор Г.Я., Ашихмина Т.Я. Защита древесины от разрушения с использованием антисептиков, получаемых из промышленных отходов (обзор) // Теоретическая и прикладная экология. 2022. № 4. С. 6–13.
16. Распоряжение Правительства РФ от 26.09.2013 № 1724-р «Об утверждении Основ государственной политики в области использования, охраны, защиты и воспроизводства лесов в Российской Федерации на период до 2030 года» // Собрание законодательства Российской Федерации. 2013. № 40 (часть III). Ст. 5096.
17. Распоряжение Правительства РФ от 11.02.2021 № 312-р «Об утверждении Стратегии развития лесного комплекса Российской Федерации до 2030 года» // Собрание законодательства Российской Федерации. 2021. № 8 (часть II). Ст. 1398.
18. Абанина Е.Н. Правовые основы современного государственного управления лесным хозяйством // Правовая политика и правовая жизнь. 2021. № 2. С. 31–37.
19. Жаворонкова Н.Г., Выпханова Г.В. Правовые проблемы и направления совершенствования государственного управления в области лесных отношений // Lex Russica. 2018. № 2 (135). С. 78–93.
20. Доронин М.С. Воспроизводство лесов как основа интенсивного лесного хозяйства: региональные аспекты // Лесотехнический журнал. 2016. № 2. С. 7–15.
21. Петров В.Н., Каткова Т.Е., Карвинен С. Тенденции развития лесной экономики в России и Финляндии // Экономические и социальные перемены: факты, тенденции, прогноз. 2019. Т. 12. № 3. С. 140–157.
22. Hynynen J., Ojansuu R., Hokka H., Siipilehto J., Salminen H., Haapala P. Models for predicting stand development in MELA system. The Finnish Forest Research Institute, 2002. 211 p.
23. Smith W., Lee P. Canada's forests at a crossroads: An assessment in the year 2000. Global Forest Watch Report. Washington DC, 2002. 107 p.
24. Smith W.B., Miles D.P., Vissage S.J. Forest resources of the United States, 2002. St. Paul, Minnesota: U.S. Department of agriculture, 2004. 243 p.
25. Морковина С.С., Зиновьева И.С., Шанянь Б. Противоречия экономических интересов государства и субъектов малого и среднего предпринимательства, функционирующих в лесном хозяйстве // Лесотехнический журнал. 2014. № 3. С. 303–318.
26. Боголюбов С.А., Васильева М.И., Жариков Ю.Г. Комментарий к Лесному кодексу Российской Федерации (постатейный). М.: ТК Велби; Проспект, 2008. 399 с.
27. Каракичева И.В. Рациональное лесопользование (проблемы, особенности, перспективы) // Лесной Вестник. 2011. № 7. С. 141–147.
28. Моисеев Н.А. Концепция современного лесоустройства в России. Пушкино: ВНИИЛМ, 2017. 88 с.
29. Приказ Минприроды России от 05.08.2022 № 510 «Об утверждении Лесоустроительной инструкции» // Официальный интернет-портал правовой информации [Электронный ресурс] <http://pravo.gov.ru>, 30.09.2022 (Дата обращения: 12.02.2023).
30. Гиряев М.Д., Заварзин В.В., Полецук О.М. Концептуальные предложения к разработке порядка и методов исчисления расчётных лесосек // Природообустройство. 2017. № 5. С. 114–122.
31. Гиряев М.Д. Проблемы организации лесопользования в Российской Федерации // Лесной вестник. 2012. № 6. С. 181–186.
32. Харлов Ю.А., Николаев А.И., Самарин В.В., Штоль В.А., Бобров Д.И. Нормирование объёмов изъятия древесины при использовании лесов в Российской Федерации // Лесохозяйственная информация. 2015. № 2. С. 13–23.



33. Голотовская А.В., Дегтев В.В., Корякин В.А. Научное обоснование инструментария экономической мотивации к полному освоению расчётной лесосеки на арендованных лесных участках // Лесохозяйственная информация. 2021. № 2. С. 65–73.

34. Домрачев Д.Г. Проблемы арендных правоотношений в сфере лесозаготовительной деятельности на лесных участках, находящихся в федеральной собственности // Вестник Вятского государственного гуманитарного университета. 2014. № 4. С. 110–113.

35. Маслова Е.М., Шепелева Н.М. К вопросу о «многоцелевом» использовании лесных участков // Бизнес, менеджмент и право. 2015. № 2. С. 64–67.

36. Лаптева Е.М., Бондаренко Н.Н. Изменение гумусного состояния среднетаёжных подзолистых почв под влиянием сплошнолесосечных рубок // Теоретическая и прикладная экология. 2015. № 1. С. 34–43.

37. Гиравев М.Д., Аксенова К.С., Аксенов П.А. Принципы установления арендной платы за древесину, отпускаемую на корню // Лесной вестник. 2016. № 1. С. 176–183.

38. Домнина Е.А., Адамович Т.А., Тимонов А.С., Ашихмина Т.Я. Изучение лесовосстановления на основе спутниковых снимков высокого разрешения // Теоретическая и прикладная экология. 2021. № 3. С. 38–43.

39. Быковский В.К. Понятие устойчивого развития в соответствии с лесным законодательством // Актуальные проблемы российского права. 2021. № 8. С. 173–181.

40. Официальный сайт Министерства природных ресурсов и экологии Российской Федерации [Электронный ресурс] [https://www.mnr.gov.ru/press/news/v\\_resultate\\_proverki\\_dogovorov\\_arendy\\_lesnykh\\_uchastkov\\_rastorgnuto\\_32\\_soglasheniya/?ysclid=le5mfgzu3w925126893](https://www.mnr.gov.ru/press/news/v_resultate_proverki_dogovorov_arendy_lesnykh_uchastkov_rastorgnuto_32_soglasheniya/?ysclid=le5mfgzu3w925126893) (Дата обращения: 13.02.2023).

## References

1. Klyukanova L.G. Sustainable forest management as the basic principle of forest management in the Russian Federation // Managerial Consulting. 2015. No. 1. P. 17–28 (in Russian).

2. Myasnikov A.G., Danchenko M.A. Theoretical foundations of rational forest management // Bulletin of Tomsk State University. 2012. No. 356. P. 167–170 (in Russian).

3. Forest Code of the Russian Federation No. 200-FZ dated 04.12.2006 (ed. dated 29.12.2022) // Collection of Legislation of the Russian Federation. 2006. No. 50. St. 5278 (in Russian).

4. Rosleskhoz Order No. 203 dated 03.12.1998 “On approval of the industry standard OST 56-108-98 “Forestry. Terms and definitions” [Internet resource] <https://e-ecolog.ru/docs/BTbuUD96CkxPiwVANhFWw?ysclid=leocmt8e71241953748> (Accessed: 02.28.2023) (in Russian).

5. State (national) report on the state and use of land in the Russian Federation in 2021. Moskva: Rosreestr, 2022. 206 p. (in Russian).

6. Decree of the President of the Russian Federation No. 440 dated 01.04.1996 “On the Concept of transition of the Russian Federation to sustainable development” // Collection of Legislation of the Russian Federation. 1996. No. 15. St. 1572 (in Russian).

7. Andreeva L.V. Transition to sustainable development in the context of digital transformation in Russia: legal aspect // Law and the digital economy. 2022. No. 1. P. 14–21 (in Russian).

8. The Treaty on the European Union (Signed in Maastricht on 07.02.1992) // Official website of the legislation of the European Union [Internet resource] <http://eur-lex.europa.eu/> (Accessed: 02.28.2023) (in Russian).

9. Declaration “Transforming our World: the 2030 Agenda for Sustainable Development”, adopted by the Resolution of the United Nations General Assembly of September 25, 2015 [Internet resource] [https://unctad.org/system/files/official-document/ares70d1\\_ru.pdf](https://unctad.org/system/files/official-document/ares70d1_ru.pdf) (Accessed: 12.02.2023) (in Russian).

10. Decree of the Government of the Russian Federation dated 07.14.2021 No. 1912-r “On approval of the goals and main directions of sustainable (including green) development of the Russian Federation” // Collection of Legislation of the Russian Federation. 2021. No. 30. St. 5814 (in Russian).

11. Decree of the President of the Russian Federation dated 04.19.2017 No. 176 “On the Strategy of environmental safety of the Russian Federation for the period up to 2025” // Collection of Legislation of the Russian Federation. 2017. No. 17. St. 2546 (in Russian).

12. Gordeeva E.M., Vedernikova I.E. Forest-climatic projects in Russia: actual legal support // Theoretical and Applied Ecology. 2022. No. 2. P. 209–215 (in Russian). doi: 10.25750/1995-4301-2022-2-209-215

13. Lelekova E.V., Konovalova I.A. The state of forest phytocenosis after logging care with a violation of technology // Theoretical and Applied Ecology. 2022. No. 1. P. 56–63 (in Russian). doi: 10.25750/1995-4301-2022-1-056-063

14. Luchnikova E.M., Ilyashenko V.B., Kovalevsky A.V., Gashkov S.I., Voronina L.A., Zubko K.S., Filippova A.V. The influence of various methods of forest reclamation on the restoration of the mammalian community of the black taiga // Theoretical and Applied Ecology. 2022. No. 3. P. 183–191 (in Russian). doi: 10.25750/1995-4301-2022-3-183-191

15. Skugoreva S.G., Trefilova L.V., Domracheva L.I., Kantor G.Y., Ashikhmina T.Ya. Protection of wood from destruction using antiseptics obtained from industrial waste (review) // Theoretical and Applied Ecology. 2022. No. 4. P. 6–13 (in Russian). doi: 10.25750/1995-4301-2022-4-006-013

16. Decree of the Government of the Russian Federation dated 26.09.2013 No. 1724-r “On approval of the Fundamentals of state policy in the field of use, protection,

protection and reproduction of forests in the Russian Federation for the period up to 2030" // Collection of Legislation of the Russian Federation. 2013. No. 40 (Part III). Article 5096 (in Russian).

17. Decree of the Government of the Russian Federation No. 312-r dated 11.02.2021 "On approval of the Strategy for the development of the forest complex of the Russian Federation until 2030" // Collection of Legislation of the Russian Federation. 2021. No. 8 (Part II). Article 1398 (in Russian).

18. Abanina E.N. Legal foundations of modern state forestry management // Legal policy and legal life. 2021. No. 2. P. 31–37 (in Russian).

19. Zhavoronkova N.G., Vypkhanova G.V. Legal problems and directions of improving public administration in the field of forest relations // Lex Russica. 2018. No. 2 (135). P. 78–93 (in Russian). doi: 10.17803/1729-5920.2018.135.2.078-093

20. Doronin M.S. Forest reproduction as the basis of intensive forestry: regional aspects // Forestry Journal. 2016. No. 2. P. 7–15 (in Russian). doi: 10.12737/19948

21. Petrov V.N., Katkova T.E., Karvinen S. Trends in the development of the forest economy in Russia and Finland // Economic and social changes: facts, trends, forecast. 2019. V. 12. No. 3. P. 140–157 (in Russian). doi: 10.15838/esc.2019.3.63.9

22. Hynynen J., Ojansuu R., Hokka H., Siipilehto J., Salminen H., Haapala P. Models for predicting stand development in MELA system. The Finnish Forest Research Institute, 2002. 211 p.

23. Smith W., Lee P. Canada's forests at a crossroads: An assessment in the year 2000. Global Forest Watch Report. Washington DC, 2002. 107 p.

24. Smith W.B., Miles D.P., Vissage S.J. Forest resources of the United States, 2002. St. Paul, Minnesota: U.S. Department of agriculture, 2004. 243 p.

25. Morkovina S.S., Zinovieva I.S., Shanyan B. Contradictions of the economic interests of the state and small and medium-sized businesses operating in forestry // Forestry Journal. 2014. No. 3. P. 303–318 (in Russian). doi: 10.12737/6310

26. Bogolyubov S.A., Vasilyeva M.I., Zharikov Y.G. Commentary on the forest code of the Russian Federation (article by article). Moskva: TK Velbi; Prospect, 2008. 399 p. (in Russian).

27. Karakicheva I.V. Rational forest management (problems, features, prospects) // Forest Bulletin. 2011. No. 7. P. 141–147 (in Russian).

28. Moiseev N.A. The concept of modern forest management in Russia. Pushkino: VNIILM, 2017. 88 p. (in Russian).

29. Order of the Ministry of Natural Resources of the Russian Federation No. 510 dated 05.08.2022 "On approval of Forest management instructions" // Official Internet portal of legal information [Internet resource] <http://pravo.gov.ru> (Accessed: 12.02.2023) (in Russian).

30. Giryayev M.D., Zavarzin V.V., Poleshchuk O.M. Conceptual proposals for the development of the order and methods of calculation of calculated cutting areas // Nature management. 2017. No. 5. P. 114–122 (in Russian).

31. Giryayev M.D. Problems of forest management organization in the Russian Federation // Lesnoy vestnik. 2012. No. 6. P. 181–186 (in Russian).

32. Kharlov Y.A., Nikolaev A.I., Samarina V.V., Stoll V.A., Bobrov D.I. Rationing of volumes of wood withdrawal when using forests in the Russian Federation // Forestry Information. 2015. No. 2. P. 13–23 (in Russian).

33. Golotovskaya A.V., Degtev V.V., Koryakin V.A. Scientific substantiation of the tools of economic motivation for the full development of the calculated cutting area on leased forest plots // Forestry Information. 2021. No. 2. P. 65–73 (in Russian). doi: 10.24419/LHI.2304-3083.2021.2.06

34. Domrachev D.G. Problems of lease legal relations in the field of logging activities on forest plots that are federally owned // Bulletin of Vyatka State University for the Humanities. 2014. No. 4. P. 110–113 (in Russian).

35. Maslova E.M., Shepeleva N.M. On the issue of "multipurpose" use of forest plots // Business, management and law. 2015. No. 2. P. 64–67 (in Russian).

36. Laptva E.M., Bondarenko N.N. The change in the humus state of middle taiga podzolic soils under the influence of continuous logging // Theoretical and Applied Ecology. 2015. No. 1. P. 34–43 (in Russian). doi: 10.25750/1995-4301-2015-1-034-043

37. Giryayev M.D., Aksenova K.S., Aksenov P.A. Principles of establishing rent for wood sold on the vine // Lesnoy vestnik. 2016. No. 1. P. 176–183 (in Russian).

38. Domnina E.A., Adamovich T.A., Timonov A.S., Ashikhmina T.Y. Study of reforestation based on high-resolution satellite images // Theoretical and Applied Ecology. 2021. No. 3. P. 38–43 (in Russian). doi: 10.25750/1995-4301-2021-3-038-043

39. Bykovsky V.K. The concept of sustainable development in accordance with forest legislation // Actual problems of Russian law. 2021. No. 8. P. 173–181 (in Russian).

40. Official website of the Ministry of Natural Resources and Ecology of the Russian Federation [Internet resource] [https://www.mnr.gov.ru/press/news/v\\_rezultate\\_proverki\\_dogovorov\\_arendy\\_lesnykh\\_uchastkov\\_rastorgnuto\\_32\\_soglasheniya/?ysclid=le5mfgzu3w925126893](https://www.mnr.gov.ru/press/news/v_rezultate_proverki_dogovorov_arendy_lesnykh_uchastkov_rastorgnuto_32_soglasheniya/?ysclid=le5mfgzu3w925126893) (Accessed: 13.02.2023) (in Russian).

## Биоремедиация техногенно деградированных земель после завершения специальной военной операции на территории новых субъектов Российской Федерации

© 2023. Т. Я. Ашихмина<sup>1,2</sup>, д. т. н., г. н. с., зав. лабораторией,  
Л. И. Домрачева<sup>1,3</sup>, д. б. н., профессор,  
И. П. Погорельский<sup>4</sup>, д. м. н., в. н. с.,

А. А. Лещенко<sup>4</sup>, д. т. н., в. н. с., А. Ю. Миронина<sup>2</sup>, к. фил. н., доцент,  
В. С. Лобастов<sup>4</sup>, к. т. н., с. н. с., А. В. Сенькин<sup>4</sup>, к. м. н., м. н. с.,

<sup>1</sup>Институт биологии Коми научного центра

Уральского отделения Российской академии наук,

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

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

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

<sup>3</sup>Вятский государственный агротехнологический университет,

610017, Россия, г. Киров, Октябрьский проспект, д. 133,

<sup>4</sup>Филиал Федерального государственного бюджетного учреждения

«48 Центральный научно-исследовательский институт»

Министерства обороны Российской Федерации,

610000, Россия, г. Киров, Октябрьский проспект, д. 19,

e-mail: ecolab2@gmail.com

Одними из последствий специальной военной операции по демилитаризации и денацификации территории Украины, прилегающей к границам Российской Федерации, являются тяжёлые экологические последствия, связанные с разрушением природного ландшафта, близком к состоянию коллапса – необратимой утрате биологической его продуктивности. Предстоит разработать и утвердить федеральную целевую программу по приведению территорий, где проводилась специальная военная операция, в экологически безопасное состояние, пригодное для жизни людей, а также для флоры и фауны. Реализация данной федеральной целевой программы потребует комплексного подхода, обеспечивающего восстановление нарушенных земель и их возвращение к использованию по целевому назначению. Вполне закономерно, что восстановление деградированных земель предстоит осуществлять с обязательным учётом потенциала растительно-микробных комплексов (природных или искусственно созданных) в ходе биоремедиации почвы. Совокупность теоретических и экспериментальных данных даёт основание полагать о готовности и возможности внедрения соответствующих разработок в практику биоремедиации деградированных земель.

**Ключевые слова:** микроорганизмы, растительно-микробные комплексы, деградация почвы, биоремедиация.

## Bioremediation of technogenically degraded lands after the completion of a special military operation on the territory of new subjects of the Russian Federation

© 2023. T. Ya. Ashikhmina<sup>1,2</sup>, ORCID: 0000-0003-4919-0047<sup>1</sup>

L. I. Domracheva<sup>1,3</sup>, ORCID: 0000-0002-7104-3337<sup>1</sup>, I. P. Pogorelsky<sup>4</sup>, ORCID: 0000-0001-6293-7366,

A. A. Leschenko<sup>4</sup>, ORCID: 0000-0003-1229-503X<sup>1</sup>, A. Yu. Mironina<sup>2</sup>,

V. S. Lobastov<sup>4</sup>, A. V. Senkin<sup>4</sup>,

<sup>1</sup>Institute of Biology of the Komi Science Centre of the Ural Branch

of the Russian Academy of Sciences,

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

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

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

<sup>3</sup>Vyatka State Agrotechnological University,

133, Oktyabrskiy Prospekt, Kirov, Russia, 610017,

<sup>4</sup>Branch of the Federal State Budgetary Institution "48 Central Research Institute"

of the Ministry of Defense of the Russian Federation,

119, Oktyabrskiy Prospekt, Kirov, Russia, 610000,

e-mail: ecolab2@gmail.com

One of the consequences of a special military operation to demilitarize and denazify the territories of Ukraine adjacent to the borders of the Russian Federation is the severe environmental consequences associated with the destruction of the natural landscape, close to the state of collapse – the irreversible loss of its biological productivity. It is necessary to develop and approve a federal target program to bring the territories where a special military operation was carried out into an ecologically safe state suitable for human life, as well as for representatives of the flora and fauna. The implementation of this federal target program will require an integrated approach to ensure the restoration of disturbed lands and their return to use for their intended purpose. It is quite natural that the restoration of degraded lands will have to be carried out with the obligatory consideration of the potential of plant-microbial complexes (natural or artificially created) in the course of soil bioremediation. The totality of theoretical and experimental data gives grounds to believe that the relevant designs are ready and possible to be introduced into the practice of bioremediation of degraded lands.

**Keywords:** microorganisms, plant-microbial complexes, soil degradation, bioremediation.

Человеческая жизнь на протяжении всего своего существования на планете неотделима от природы. Во всемирно известном музыкально-поэтическом произведении Фридриха Шиллера и Людвиг ван Бетховена Ода «К радости» утверждается: «Мать природа всё живое соком радости поит, всем даёт своей рукою долю счастья без обид...» [1]. И каждый живущий на земле с незамутнённым сознанием это понимает и принимает. Во многих социологических опросах на часто задаваемый вопрос, какой бы вы хотели видеть окружающую среду, респонденты упоминали такие вещи, как чистая вода, чистый воздух, плодородная почва и высокопродуктивное сельское хозяйство, отсутствие опасных отходов и обширные нетронутые человеком пространства с богатым животным и растительным миром. Но больше всего людей волнует предсказуемое взаимоотношение с природой, чтобы можно было с уверенностью смотреть в будущее, зная, что всё перечисленное выше не деградирует и не исчезнет, а будет сохраняться, постоянно возобновляясь.

Без преувеличения можно говорить о том, что наши нынешние взаимоотношения с природой весьма далеки от устойчивости и партнёрства. В «Экологическом манифесте» [2] говорится: «Тысячелетиями мы боролись с природой, покоряли её, преобразовывали, нещадно уничтожали». Действительно, наши действия приводят к истощению и деградации природы. Данное состояние очень ёмко определил французский учёный естествоиспытатель, создатель первой эволюционной теории Жан-Батист Ламарк, который ещё в 1820 г. писал: «Можно, пожалуй, сказать, что предна-

значение человека как бы заключается в том, чтобы уничтожить свой род, предварительно сделав земной шар непригодным для обитания» [цит. по 2]. С высоты сегодняшнего дня ясно, что природная среда, как и разнообразие биологических видов, сохранились лишь там, где они были недоступны людям для «успешного» преобразования: это суровые малоприспособленные для жизни земли с экстремальными для человека условиями существования. Поскольку человеческое общество превратилось в мощную природную силу, целенаправленно и необратимо преобразующую окружающую среду, возникает вопрос о тенденции таких преобразований. Относительно почвы со всей определённой можно говорить о негативной тенденции: темпы разрушения почвенного покрова значительно выше, чем скорость образования, а в некоторых странах Европы они приобрели в 70-х годах прошлого столетия угрожающие масштабы [3]. К этому следует добавить, что, согласно имеющимся данным [4], для формирования 1 см почвенного слоя требуется в зависимости от условий от 10 до 50 лет.

С сожалением приходится констатировать, что во многих странах как бы не замечают негативных тенденций воздействия человеческой деятельности, в том числе и в военной сфере, на окружающую среду. Не замечают того, что природа не вокруг нас, а в нас самих, а её беды и болезни – наши беды и болезни. Более того, политики ряда стран не желают понимать того неопровержимого факта, что однополярному миру приходит конец. Они не хотят и не могут признать того, что конфронтация как метод решения политических проблем

и способ обогащения одних за счёт других остались в историческом прошлом. Нынешний единый мир подобен организму с его органами. Любое военное противостояние опасно для всех стран и народов, разорительно для них, а потому война и угроза войны есть преступление перед всем миром, всеми людьми, нынешними и будущими поколениями [5, 6]. Сейчас даже региональные войны, отвлекая от решения экологических проблем, оказываются направленными против всего человечества, т. е. теряют локальный характер и приобретают мировое значение, подвергая опасности всё население планеты.

Цель обзора – обосновать возможность использования технологии биоремедиации, основанной на применении микробных биопрепаратов, для восстановления техногенно деградированных земель новых субъектов Российской Федерации после завершения специальной военной операции.

### Объекты и методы исследования

Объектом литературного обзора является анализ возможностей и особенностей использования микроорганизмов различной видовой принадлежности естественного происхождения и созданных с использованием методов генной инженерии, а также биопрепаратов с ферментативной активностью и их консорциумов, перспективных для применения в микробной биоремедиации деградированных в ходе специальной военной операции земель. Для обзора использованы литературные источники (1979–2022 гг.) из базы данных научной электронной библиотеки, освещающей исследование отечественных и зарубежных учёных по этой тематике. Поиск источников проводили на сайте eLIBRARY.RU, а также при помощи поисковых систем Яндекс и Google по поисковым запросам: «деградация почвы», «биоремедиация», «микроорганизмы-деструкторы», «микроорганизмы-активаторы», «биокализаторы», «растительно-микробные ассоциации». На основе анализа изученных материалов определены подходы для проведения успешной биоремедиации техногенно деградированных земель.

### Экологическое состояние районов проведения специальной военной операции

Военные действия в Чечне при участии коллективного Запада нанесли крупномас-

штабный, долговременный и тяжёлый ущерб лесам, плодородным земельным угодьям, пастбищам. «Зачистка природы» через уничтожение растительности и почвы стала войной против будущих поколений жителей республики [7]. История войн – это история, в том числе, уничтожения природы и экологических катастроф. Почти все военные действия всегда сопровождалась изменениями и разрушениями природной среды, приводя к экоциду и детериорации [8, 9].

Был предложен критерий оценки деградации экологических систем с использованием показателей темпов их самовосстановления, учитывающих качественно-количественное состояние и биологическую продуктивность [2]. Выделяется 6 этапов данного деструктивного процесса, начиная от естественного состояния, при котором наблюдается лишь фоновое антропогенное воздействие, и далее через равновесное, кризисное и критическое состояния к катастрофическому состоянию как труднообратимому процессу закрепления малопродуктивных экосистем, у которых биомасса и биологическая продуктивность минимальны, а затем к состоянию коллапса – необратимой утрате биологической продуктивности, когда биомасса стремится к нулю. К этому следует добавить, что в настоящее время при разработке экологической политики и социально значимых мероприятий, направленных на улучшение здоровья населения [10], также предложено использовать индекс экологического благополучия и методику его расчёта, основанную на данных официальной статистики, с использованием условной нормы, соответствующей 50% обеспеченности показателя техногенного воздействия, позволяющие объективно наметить и научно обоснованно реализовывать планируемые мероприятия.

Очевидно, что война – это не только гуманитарная катастрофа, которая уносит жизни и здоровье людей, отбрасывает назад науку и культуру, причиняет материальный ущерб. Но от военных действий не меньше страдает природа [5, 6, 9, 11]. Применение оружия XX и XXI веков в значительной степени изменяет рельеф земной поверхности. Взрывчатые вещества разрушают её и превращают в изрытую кратерами «длительно незаживающую рану земли», что нарушает экосистему, сложившуюся в конкретной местности, но ещё более тяжёлыми последствиями от боевых действий являются отравления почвы, воды и воздуха. Причиной загрязнений является боевая тех-

ника: самолёты, танки, боевые суда, оставляющие выражено негативный экологический след. Для них нет нормативов выхлопов и выбросов вредных веществ, а при затоплении техники в реках, болотах топливо и масло разливаются, образуя нефтяные «озёра».

В результате военных действий происходит угнетение флоры и фауны [5–7, 9–11]. Страдают деревья – они гибнут от взрывов снарядов, уничтожаются при расчистке территорий и возведении укреплений и переправ. Ужасы войны ощущают на себе животные [6–8, 10]. На территории, где ведутся боевые действия, гибнут тысячи живых существ. Виной этому являются пожары, взрывы, токсичные вещества, попадание пуль, осколков, тяжёлая боевая техника.

Бедствие не кончается с наступлением мира: в почве остаются мины, неразорвавшиеся авиационные бомбы и фугасы, снаряды и другие боеприпасы, которые могут напомнить о себе через несколько лет. Считается, что до 10% боеприпасов не взрываются на поле боя [6, 7]. Один из серьёзных видов экологического ущерба – материальные остатки военных действий (так называемое «эхо войны»): руины зданий, воронки от бомб и снарядов, почвенные провалы, повреждённая военная техника, бетонные блок-посты, доты, дзоты, многочисленные рвы, окопы, осколки снарядов.

Уже сейчас ясно, что разрушение природы в ходе военных действий будет иметь глубокие долговременные последствия. Важно подчеркнуть, что при любом экологическом воздействии наибольшую опасность представляют не только вновь выявленные эффекты. Гораздо больше угрожает перспектива тех существенных медленно накапливающихся изменений, которые могут происходить вследствие малоизученных химических реакций [12]. Преодоление катастрофических экологических последствий требует глубокого научного подхода, умения преодолевать такие страшные явления как эрозия, заболачивание почвы, накопление в них тяжёлых металлов и органических соединений, и других загрязнителей [9, 11, 13–15].

Ограниченность и конечность природных возможностей социально-экономического и физического развития человечества диктуют необходимость чёткого знания размеров глобальных, региональных и локальных ресурсов, крайне важных для поступательного развития человечества. Другим итогом такого знания об оскудевающих ресурсах планеты

является стремление стран коллективного Запада «освоить» ресурсы России, причём военным путём. Украина стала «антироссийским» государством, и дальнейшее расширение НАТО на восток с каждым годом становилось для России всё опаснее. России не оставили другого выбора для защиты территории и российского народа. Ситуация потребовала решительных и немедленных действий. Президент Российской Федерации В.В. Путин 24 февраля 2022 г. подписал Указ о начале специальной военной операции Вооружённых Сил на Украине, основной целью которой являлась демилитаризация и денацификация Украины. Главная задача состоит в защите жителей Донецкой народной Республики и Луганской народной Республики, Херсонской и Запорожской областей, которые на протяжении 8 лет подвергались издевательствам и геноциду со стороны киевских властей.

#### **Экологизация реабилитационных мероприятий по обеспечению санации территории бывших боевых действий**

Специальная военная операция по демилитаризации и денацификации Украины является лишь важной частью внешнеполитической стратегии Российской Федерации и предусматривает локализацию конфликта с соблюдением всех интересов России. Это, в свою очередь, предопределяет необходимость приведения в безопасное состояние присоединившихся к России территорий, мало пригодных для жизни в мирное время не только людей, животных и растений, но и многих почвенных обитателей. Данное обстоятельство служит императивом для экологизации восстановительных мероприятий, обеспечивающих эффективную санацию территорий боевых действий.

Нет сомнения в том, что будет разработана и утверждена федеральная целевая программа по приведению территорий военных действий в экологически безопасное состояние и будет разработана и утверждена технология очистки загрязнённых территорий с учётом того, что многочисленные загрязнения могут быть причиной таких последствий, как торможение почвообразовательных процессов и самоочищения почвы, значительного изменения видового состава и жизнеспособности почвенной микробиоты, накопления вредных веществ в окружающей среде, которые прямо или опосредованно могут оказывать влияние на здо-

ровые человека. Вся эта информация крайне необходима для успешного осуществления биоремедиации – комплекса мероприятий, направленных на очистку и восстановление свойств природных сред, в частности, почв, грунтов, донных осадков. При этом важно понимать, что уже нельзя будет ограничиваться только восстановлением нарушенного массива плодородных земель, созданием растительного покрова, а важно будет восстанавливать и все другие компоненты природной среды. При этом микроорганизмы, в частности, почвенная микробиота, должны рассматриваться как необходимый естественный элемент и активный участник биоремедиации [15–17]. Необходим комплексный подход, обеспечивающий восстановление деградированных земель и их возвращение в сельско-, лесохозяйственное и другое использование [8–11, 13].

Вполне закономерно, что восстановление деградированных земель немислимо без учёта естественной (аборигенной) микробиоты, а также без интродукции специально выделенных или созданных штаммов микроорганизмов, и, таким образом, микробную биоремедиацию почвы по своей сути следует рассматривать как составную часть биотехнологии – санации деградированных земель [18, 19]. В этой связи отметим, что впервые термин «биотехнология» был предложен венгерским инженером Карлом Эрике [цит. по 18] ещё в 1917 г. в связи с изучением процесса крупномасштабного выращивания свиней. Официально термин «биотехнология» вошёл в научный оборот лишь в конце 1961 г. по предложению шведского микробиолога Карла Герена Хадена, предложившего заменить название научного журнала «Журнал микробиологической и химической инженерии и технологии» на «Биотехнология и биоинженерия» [цит. по 18]. До этого наука о важнейших микробиологических процессах, связанных с получением индустриальным способом ценных продуктов, называлась технологией или промышленной микробиологией.

В настоящее время рассматриваются три подхода для реализации потенциала биоремедиации почв с использованием микроорганизмов [16, 19]: биостимуляция (стимулирование развития аборигенной микробиоты); биодополнение (внесение в почву биопрепаратов микроорганизмов, способных к деградации загрязнителей-экоотоксикантов); фитостимуляция (использование растений с целью стимуляции развития ризосферных

микроорганизмов). Саму же биоремедиацию предваряют три этапа. Первый этап – подготовительный, включающий подготовку к работе оборудования, составление проектной и рабочей документации, подготовку бюджета. Второй этап – технический, обеспечивающий ускорение процессов физического очищения почв. На данном этапе с использованием современной техники корректируется ландшафт, т. е. засыпаются рвы, траншеи, ямы, впадины, провалы грунта, разравниваются и террасируются промышленные территории, создаются гидротехнические и мелиоративные сооружения и др. При необходимости предусматриваются мероприятия по снятию, складированию, хранению плодородного слоя почвы.

Таким образом, технический этап обеспечивает, с одной стороны, ускорение процессов физического очищения почвы, а с другой, значительно сокращает сроки разложения растительных остатков [18].

После завершения технического этапа выполняется непосредственно этап биоремедиации. При этом необходимо иметь в виду, что военные действия определённо ведутся без учёта условий функционирования экологических систем, а сами военные действия могут вызвать изменения количества и качества экологических комплексов, ведущих к замене одной экосистемы другой, которая может быть не всегда желательной. И хотя искусственные изменения экосистем вследствие военных действий нередко бывают перманентными [13, 14, 18], их глубина, не соответствующая «выносливости» самих экосистем, часто приводит к деградации последних и их неспособности к самовосстановлению и саморегуляции. Поэтому в данном случае классический подход к восстановлению деградированных экосистем с учётом экологической комплементарности составляющих экосистемы элементов, их конгруэнтности, равновесия, экологической коррекции и оптимальности в компонентной дополнении, а также частных приспособлений биоты экосистем неприемлем [2]. Такие тонкие качественные изменения структуры экосистем нельзя учесть во всей полноте на начальной стадии биоремедиации техногенно деградированных в ходе военных действий земель. Однако, опираясь на имеющиеся данные о наличии у экосистем универсальных механизмов, которые обеспечивают их потенциальную устойчивость, по-видимому, следует вначале использовать

на практике фитостимулирующий подход к реализации потенциала биоремедиации, включающий подготовку почвы, внесение удобрений и биопрепаратов, подбор трав и травосмесей и их посев, уход за посевами. Всё вместе взятое обеспечивает закрепление поверхностного слоя почвы корневой системой растений, создание сомкнутого травостоя и предотвращает развитие водной и ветровой эрозии на нарушенных землях при одновременном стимулировании развития ризосферных микроорганизмов [8, 20, 21].

Реализация потенциала биоремедиации при использовании такого подхода как биодополнение может быть осуществлена в ходе обработки почвы *in situ* путём стимулирования размножения природных микроорганизмов-деструкторов, аэрации и введения в почву питательных веществ; внесении в почву биокатализаторов на основе ферментов, суспензий или лиофилизированных бактерий-деструкторов, а также иммобилизованных ферментов и консорциумов микроорганизмов; обработки почвы иммобилизованными ферментными препаратами бактерий-деструкторов, устойчивыми к большим концентрациям экотоксикантов; внесении (интродукции) в почву биопрепаратов, сконструированных на основе специализированных микроорганизмов или микроорганизмов в составе растительно-микробных ассоциаций [8, 20, 21]. При этом, как отмечено в работе [22], микробные ассоцианты всегда находятся в выигрышном положении, поскольку их качественный и количественный состав находится в динамическом равновесии за счёт возможности использования в качестве источников питания как метаболитов, так и самих растительных клеток.

Ещё одним подходом к реализации потенциала биоремедиации является биостимуляция, основную роль в которой играют микроорганизмы аборигенной микробиоты, выделенные из мест их естественной адаптации к чужеродным агентам. Это имеет принципиальное значение, поскольку согласно принципу Р. Риклефса [23]: эффективность сообщества макро- и микроорганизмов и его стабильность возрастают прямо пропорционально той степени, в которой составляющие её популяции в процессе эволюции адаптировались друг к другу. В этой связи биоремедиация имеет свои особенности. Так, микроорганизмы не должны быть экологически чужеродными, но должны быть экологически безопасными, непатогенными, генетически однородными (в плане стабильности генов биодеструкции

экотоксикантов), совместимыми друг с другом и с почвенными микроорганизмами, а также обладать такими важными свойствами, как способность элиминации из экосистемы при полной деградации субстрата биодеструкции. Элиминация микроорганизмов-деструкторов из экосистемы имеет существенное значение для предотвращения процесса «депривации» микробного сообщества, которая обычно происходит на фоне интенсивного размножения интродуцированных видов организмов, что приводит к исчезновению или видоизменению экологических ниш функционально близких видов, создавая предпосылки сохранения их численности, или наоборот, их массового размножения. В настоящее время разработана технология получения биопрепарата на основе микроорганизмов аборигенной микробиоты, находящихся в составе биопрепарата в лиофилизированном состоянии. В ходе санации и рекультивации загрязнённых почв могут быть использованы различные технологии, в том числе биотехнологические методы. Так, выполнен комплекс исследований, связанных с оценкой возможности создания новой формы двухкомпонентного биопрепарата, объединяющего бактерии *Pseudomonas fluorescens* ЕК-5-93 и *P. putida* ЕК-8-4 – эффективных деструкторов фосфорорганических соединений и углеводов нефти с клубеньковыми бактериями *Rhizobium loti*, семенами нефетолерантного бобового растения лядвенца рогатого *Lotus corniculatus*, а также с бактериями штамма-деструктора экотоксикантов *P. delhiensis* В-11400 в составе растительно-микробной ассоциации. Двухкомпонентный биопрепарат в новой форме с расширенным спектром деградативной активности биосовместимых, экологически безопасных микроорганизмов природного происхождения в ассоциации с семенами бобового растения в результате синергидного эффекта входящих в его состав биологически активных компонентов может быть использован для санации территории [24]. Технология позволяет получать биопрепарат в короткие сроки. Микроорганизмы-деструкторы в составе биопрепарата находятся в лиофилизированном состоянии, но своей жизнеспособности не теряют. Восстановив свою жизнеспособность после интродукции в почву, они способны в результате биосовместимости взаимодействовать с почвенной микробиотой, оказывая на неё синергидный эффект, и, таким образом, содействовать активизации так называемым «экогеноэлементам» экосистем [2].



## Заключение

Человек как биологическое существо генетически приспособлен к тем условиям жизни, которые существовали в период его первоначальной эволюции. Эти условия в корне меняются в ходе военных действий, а генетическая адаптация к новым условиям существования не может произойти быстро. Создающиеся экстремальные условия существования являются результатом глубокого дисбаланса в системе окружающая среда – генетика человека. Закономерно, что восстановление экологического статуса техногенно деградированных земель является экологическим императивом. И только при восстановлении и устойчивом функционировании деградированных земель могут сложиться определённые специфические отношения между человеком, животными и растениями, а также микробными сообществами, определяемые многими биотическими и абиотическими факторами. Данное обстоятельство обуславливает необходимость использования технологии биоремедиации деградированных в ходе военных действий земель. И это как раз тот случай, когда логика намерений соответствует логике обстоятельств. На сегодняшний день целесообразно применять для биоремедиации почвы, основанной на использовании метаболитического потенциала живых организмов, относящихся как к аборигенной микрофлоре, обитающей в подлежащей санации почве, так и создаваемым в лабораторных условиях микроорганизмам рода *Escherichia*, *Pseudomonas*, обеспечивающих биосинтез специфических ферментов – деструкторов поллютантов и экотоксикантов, а также биопрепаратов на основе растительно-микробных ассоциаций бактерий *Pseudomonas* sp., *Rhizobium* sp., бобового растения *L. corniculatus* и растительно-микробных комплексов на основе бактерий антагонистов в сочетании с ростстимуляторами и биодеструкторами.

*Работа выполнена в рамках государственного задания ИБ ФИЦ Коми НЦ УрО РАН по теме «Структура и состояние компонентов техногенных экосистем подзоны южной тайги», номер государственной регистрации в ЕГИСУ № 1220401000325.*

## Литература

- Schiller F. An die Freude. Ода «К радости». Перевод на русский [Электронный ресурс] lyricstranslate.com/ru/die-frende-oda-k-radost.html (Дата обращения: 19.10.2022).
- Реймерс Н.Ф. Экология (теории, законы, правила, принципы и гипотезы). М.: Журнал «Россия молодая», 1994. 367 с.
- Heigerer H. Landwirtschaft und umweltbelastung // Schriften Agrar wiss, Fachbereichs Univ. Kill. 1979. No. 51. P. 290–304.
- Belgibayev M.E. On the maximum permissible value of soil deflation // Прогрессивные направления проектирования, строительства и эксплуатации мелиоративных систем в условиях Сибири: Тезисы докладов республиканского семинара. Красноярск, 1978. С. 252–254.
- The environmental consequences of war: legal, economic, and scientific perspectives / Eds. J.E. Austin, C.E. Bruch. Cambridge University Press, 2000. 712 p.
- Brauer J. War and nature: the environmental consequences of war in a globalized world. Lanham: AltaMira Press, 2009. 233 p.
- Зонн С.В., Зонн И.С. Экологические последствия военных операций в Чечне [Электронный ресурс] [https://portales.ru/modules/Warcraft/rus\\_readme.php?subaction=showfull&id=1096300781&archive=777&start\\_from=&ucat=&](https://portales.ru/modules/Warcraft/rus_readme.php?subaction=showfull&id=1096300781&archive=777&start_from=&ucat=&) (Дата обращения: 19.10.2022).
- Евдокимова Г.А. Почвенная микробиота как фактор устойчивости почв к загрязнению // Теоретическая и прикладная экология. 2014. № 2. С. 17–24.
- Гаджиева С.Р., Алиева Т.И., Велиева З.Т., Ализаде Б.Ф., Гаджиева Х.Ф. Война и экология. Конфликт между природой и человеком в период военного столкновения [Электронный ресурс] <https://cyberleninka.ru/article/n/voyna-i-ekologiya-konflikt-mezhdu-prirodoy-i-chelovekom-v-period-voennyh-stolknoveniy> (Дата обращения: 19.10.2022).
- Минкина А.В., Двинских С.А., Зуева Т.В. Подход к разработке интегрального индекса экологической безопасности территорий // Теоретическая и прикладная экология. 2022. № 3. С. 235–240.
- Рамад Ф. Основы прикладной экологии: Воздействие человека на природу. Л.: Гидрометеиздат, 1981. 544 с.
- Янковская А.А., Филимонов И.В., Завьялова Н.В., Голипад А.Н., Ковтун В.А. Экологически безопасная биоремедиация почвы и очистка воды *in situ* от продуктов деструкции отравляющих веществ // Теоретическая и прикладная экология. 2016. № 4. С. 89–95.
- Григоров С.И., Родионов А.С. Военная экология и экологическое обеспечение Вооружённых сил Российской Федерации // Военная мысль. 1994. № 2. С. 44–50.
- Экология. Военная экология / Под ред. В.И. Исакова. М.–Смоленск: ИД Камертон-Маджента, 2006. 724 с.
- Schacht O., Kennet A. Soil bioremediation: *in-situ* vs *ex-situ* (Costs, Benefits and Effects). WSP and Göteborg Energi, 2002. 77 p.
- Лещенко А.А., Погорельский И.П., Ашихмина Т.Я., Лундовских И.А., Дармов И.В., Янов С.Н., Лазыкин А.Г., Шабалина М.Р., Устюжанин И.А., Шаров С.А., Рыч-

ков Г.М. Микробная биотехнология рекультивации почвы для санирования и устойчивого функционирования техногенной экосистемы // Теоретическая и прикладная экология. 2017. № 4. С. 54–64.

17. Лещенко А.А., Погорельский И.П., Кучеренко А.С. Перспективы внедрения биотехнологий для поддержания экологического статуса пунктов постоянной дислокации Вооружённых сил Российской Федерации // Военная мысль. 2020. № 11. С. 96–101.

18. Егоров Н.С. Микробная биотехнология: становление и состояние // Вестник Московского университета. Серия 16. Биология. 2012. № 1. С. 47–50.

19. Биоремедиация [Электронный ресурс] <https://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%91%D0%B8%D0%BE%D1%80%D0%B5%D0%BC%D0%B5%D0%B4%D0%B8%D0%B0%D1%86%D0%B8%D1%8F> (Дата обращения: 19.10.2022).

20. Munro N.B., Talmage S.S., Griffin G.D., Waters L.C., Watson A.P., King J.F., Hauschidi V. The source, fate and toxicity of chemical warfare agents degradation products // Research Review. 1999. V. 107. No. 12. P. 933–974.

21. Домрачева Л.И., Скугорева С.Г., Ковина А.Л., Коротких А.И., Стариков В.А., Ашихмина Т.Я. Специфика растительно-микробных комплексов при антропогенном загрязнении почвы (обзор) // Теоретическая и прикладная экология. 2022. № 3. С. 14–25.

22. Haldar S., Sengupta S. Microbial ecology at rizo-sphere: bioengineering and future prospective // Plant microbe interaction: an approach to sustainable agriculture / Eds. D. Choudhary, A. Varma, N. Tuteja. Singapore: Springer, 2016. P. 63–96.

23. Риклефс Р. Основы общей экологии / Под ред. Н.Н. Карташева. М.: Мир, 1979. 424 с.

24. Лазыкин А.Г., Лещенко А.А., Ашихмина Т.Я., Погорельский И.П., Дармов И.В., Лундовских И.А., Устюжанин И.А., Шаров С.А. Оценка возможности использования растительно-микробных ассоциаций при рекультивировании почвы на объекте «Марадыковский» // Теоретическая и прикладная экология. 2016. № 4. С. 96–104.

## References

1. Schiller F. An die Freude [Internet resource] <https://lyricstranslate.com/ru/die-freude-oda-k-radosti.html> (Accessed: 19.10.2023) (in German and in Russian).

2. Reymers N.F. Ecology. Moskva: Rossiya molodaya, 1994. 367 p. (in Russian).

3. Heigerer H. Landwirtschaft und umweltbelastung // Schriften Agrar wiss, Fachbereichs Univ. Kill. 1979. No. 51. P. 290–304 (in German).

4. Belgibayev M.E. On the maximum permissible value of soil deflation // Progressive directions of design, construction and operation of reclamation systems in Siberia: Tezisy dokladov respublikanskogo seminar. Krasnoyarsk, 1978. P. 252–254 (in Russian).

5. The environmental consequences of war: legal, economic, and scientific perspectives / Eds. J.E. Austin, C.E. Bruch. Cambridge University Press, 2000. 712 p.

6. Brauer J. War and nature: the environmental consequences of war in a globalized world. Lanham: AltaMira Press, 2009. 233 p.

7. Zonn S.V., Zonn I.S. Environmental consequences of military operations in Chechnya [Internet resource] [https://portalus.ru/modules/warcraft/rus\\_readme.php?subaction=showfull&id=1096300781&archive=777&start\\_from=&ucat=&](https://portalus.ru/modules/warcraft/rus_readme.php?subaction=showfull&id=1096300781&archive=777&start_from=&ucat=&) (Accessed: 19.10.2022) (in Russian).

8. Evdokimova G.A. Soil microbiota as a factor in soil resistance to pollution // Theoretical and Applied Ecology. 2014. No. 2. P. 17–24 (in Russian). doi: 10.25750/1995-4301-2014-2-017-024

9. Gadzhieva S.R., Alieva T.I., Velieva Z.T., Alizade B.F., Gadzhieva H.F. War and ecology. The conflict between nature and man during a military clash [Internet resource] <https://cyberleninka.ru/article/n/voyna-i-ekologiya-konflikt-mezhdu-prirodoy-i-chelovekom-v-period-voennyh-stolknoveniy> (Accessed: 19.10.2022) (in Russian).

10. Minkina A.V., Dvinskikh S.A., Zueva T.V. An approach to the development of an integral index of ecological well-being of the territory // Theoretical and Applied Ecology. 2022. No. 3. P. 235–240 (in Russian). doi: 10.25750/1995-4301-2022-3-235-240

11. Ramad F. Fundamentals of applied ecology: Human impact on nature. Leningrad: Gidrometeoizdat, 1981. 544 p. (in Russian).

12. Yankovskaya A.A., Filimonov I.V., Zavyalova N.V., Golipad A.N., Kovtun V.A. Ecologically safe bioremediation of soil and water purification *in situ* from chemical warfare agents destruction products // Theoretical and Applied Ecology. 2016. No. 4. P. 89–95 (in Russian). doi: 10.25750/1995-4301-2016-4-089-095

13. Grigorov S.I., Rodionov A.S. Military ecology and environmental support of the Armed Forces of the Russian Federation // Voyennaya mysl. 1994. No. 2. P. 44–50 (in Russian).

14. Ecology. Military ecology / Ed. V.I. Isakov. Moskva–Smolensk: ID Kamerton-Madzhenta, 2006. 724 p (in Russian).

15. Schacht O., Kennet A. Soil bioremediation: *in-situ* vs *ex-situ* (Costs, Benefits and Effects). WSP and Göteborg Energi, 2002. 77 p.

16. Leshchenko A.A., Pogorelsky I.P., Ashikhmina T.Ya., Lundovskikh I.A., Darmov I.V., Yanov S.N., Lazыкин A.G., Shabalina M.R., Ustyuzhanin I.A., Sharov S.A., Rychkov G.M. Microbial biotechnology of soil remediation for sanitation and sustainable functioning of the technogenic ecosystem // Theoretical and Applied Ecology. 2017. No. 4. P. 54–64 (in Russian). doi: 10.25750/1995-4301-2017-4-054-065

17. Leshchenko A.A., Pogorelsky I.P., Kucherenko A.S. Prospects for the introduction of biotechnologies to maintain the ecological status of the points of permanent deployment of the Armed Forces of the Russian Federation // Voyennaya mysl. 2020. No. 11. P. 96–101 (in Russian).

18. Egorov N.S. Microbial biotechnology: formation and status // Vestnik Moskovskogo universiteta. Seriya 16. Biologiya. 2012. No. 1. P. 47–50 (in Russian).
19. Bioremediation [Internet resource] <https://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%91%D0%B8%D0%BE%D1%80%D0%B5%D0%BC%D0%B5%D0%B4%D0%B8%D0%B0%D1%86%D0%B8%D1%8F> (Accessed: 19.10.2022) (in Russian).
20. Munro N.B., Talmage S.S., Griffin G.D., Waters L.C., Watson A.P., King J.F., Hauschild V. The source, fate and toxicity of chemical warfare agents degradation products // Research Review. 1999. V. 107. No. 12. P. 933–974.
21. Domracheva L.I., Skugoreva S.G., Kovina A.L., Korotkikh A.I., Starikov P.A., Ashikhmina T.Ya. Specificity of plant-microbial complexes under anthropogenic soil pollution (review) // Theoretical and Applied Ecology. 2022. No. 3. P. 14–25 (in Russian). doi: 10.25750/1995-4301-2022-3-014-025
22. Haldar S., Sengupta S. Microbial ecology at rhizosphere: bioengineering and future prospective // Plant-microbe interaction: an approach to sustainable agriculture / Eds. D. Choudhary, A. Varma, N. Tuteja. Singapore: Springer, 2016. P. 63–96. doi: 10/1007/978-981-10-2854-0\_4
23. Ricklefs R. Fundamentals of general ecology / Ed. N.N. Kartashev. Moskva: Mir, 1979. 424 p. (in Russian).
24. Lazykin A.G., Leshchenko A.A., Ashikhmina T.Ya., Pogorelsky I.P., Darmov I.V., Lundovskikh I.A., Ustyuzhanin I.A., Sharov S.A. Assessment of the possibility of using plant-microbial associations in biotechnology of soil remediation at the facility “Maradykovskiy” // Theoretical and Applied Ecology. 2016. No. 4. P. 96–104 (in Russian). doi: 10.25750/1995-4301-2016-4-096-104

## Памяти И. П. Погорельского

Иван Петрович Погорельский (1948–2023) – доктор медицинских наук, профессор, полковник медицинской службы был активным автором практически с момента создания журнала «Теоретическая и прикладная экология», большим другом нашей редколлегии.

Талантливый учёный, высококвалифицированный специалист в области изучения генетики возбудителей инфекционных заболеваний, он принимал участие в разработке средств профилактики, диагностики и лечения особо опасных инфекций.

Его опыт, как авторитетного учёного-микробиолога, был востребован при выполнении Федеральных целевых программ «Национальная система химической и биологической безопасности Российской Федерации» и «Уничтожение запасов химического оружия в Российской Федерации». По тематике научной деятельности им подготовлено и опубликовано более 200 научных работ и патентов.

Более 20 лет Иван Петрович занимался преподавательской деятельностью на кафедре микробиологии Вятского государственного университета. Великолепный лектор, он передавал свои знания студентам многих поколений Вятского государственного университета, являясь одним из самых авторитетных и знающих преподавателей, руководил более 50 дипломными проектами выпускников университета. Под его руководством успешно защитили диссертационные работы более 10 соискателей, став кандидатами наук.

Выдержанный, доброжелательный, эрудированный Иван Петрович пользовался большим уважением коллег по работе, любовью всех, кто был с ним рядом. Его отличали сердечность и приветливость, чуткость и отзывчивость, доброта и доброжелательность, интеллигентность, постоянная готовность прийти на помощь в любом деле.

Мы в нашей редакции всегда ждали прихода Ивана Петровича с его глубоко научными статьями, с его интереснейшими рассказами о новостях науки. Иван Петрович Погорельский относился к тем людям, которые делают жизнь ярче и краше.

В нашей памяти навсегда останется этот прекрасный человек, надёжный друг и выдающийся учёный, вся жизнь которого была посвящена служению России.

*Редколлегия журнала  
«Теоретическая и прикладная экология»*

## Юбилей Н. П. Савиных



Наталья Павловна Савиных – доктор биологических наук, профессор, выдающийся учёный-ботаник, известный не только в нашей стране, но и за рубежом, замечательный педагог. Тематика её научных исследований многогранна и касается вопросов биоморфологии растений, популяционной биологии и охраны природы. На протяжении многих лет Наталья Павловна успешно развивает школу по биоморфологии растений на базе Вятского государственного университета (ВятГУ) и руководит аспирантурой. Под руководством Натальи Павловны кандидатские диссертации защитили 10 человек. В настоящее время она руководит работами ещё трёх аспирантов.

Наталья Павловна с 2012 г. выступает в роли руководителя грантов, в рамках которых проведена плодотворная работа по изучению структурной организации более 80 видов цветковых растений и их адаптаций к условиям переменного увлажнения. Отдельная линия научных интересов Натальи Павловны – исследование флоры и растительности особо охраняемых природных территорий нашего региона: ООПТ «Медведский бор» и «Белаевский бор», ГПЗ «Бушковский лес», памятника природы «Великорецкое». На протяжении многих лет Наталья Павловна плотно сотрудничала с Министерством лесного хозяйства и Министерством охраны окружающей среды Кировской области.

С активной научной деятельностью Наталья Павловна успешно совмещает педагогическую работу. На протяжении 20 лет она руководила кафедрой ботаники (позднее –

биологии). С 2017 по 2020 гг. Наталья Павловна была руководителем Центра компетенций «Использование биологических ресурсов» Института биологии и биотехнологии ВятГУ, развивая «лесную» тематику научных исследований.

Как профессор кафедры биологии и методики обучения биологии Наталья Павловна, обладая природными педагогическими качествами, со всей душой делится со студентами знаниями по биоморфологии растений и истории лесного дела, её лекции всегда увлекательны и интересны.

За годы трудовой деятельности Наталья Павловна опубликовала более 250 научных и методических работ в различных изданиях. Она принимала непосредственное участие в написании учебника для студентов вузов «Ботаника. Анатомия и морфология растений» 2006 г. издания и в этом же году по результатам своего диссертационного исследования опубликовала монографию «Род Вероника: морфология и эволюция жизненных форм».

Наталья Павловна принимала участие в работе десятков международных и региональных конференций. Мы знаем её как организатора ряда научных конференций разного уровня, многие из которых проводятся уже традиционно.

В этом году исполняется 50 лет педагогической и научной деятельности Натальи Павловны. За свою трудовую жизнь она неоднократно награждалась почётными грамотами, благодарственными письмами и другими наградами: медалью Минобрнауки РФ «За безупречный труд и отличие», значком «Отличник народного просвещения», нагрудным знаком «Почётный работник высшей школы», почётными грамотами Министерства Просвещения Российской Федерации, Департамента образования Кировской области, университета, национальной премией «Профессор года».

Наталья Павловна – учёный и профессионал своего дела, добрый, отзывчивый человек, мудрый наставник и прекрасный учитель. Мы поздравляем Наталью Павловну с юбилеем и искренне желаем крепкого здоровья, успехов во всех начинаниях, неиссякаемой энергии и оптимизма!

*Главный редактор Т. Я. Ашихмина  
и редколлегия журнала  
«Теоретическая и прикладная экология»*

## XVIII Всероссийская научно-практическая конференция с международным участием «Экология родного края: проблемы и пути их решения»

24–25 апреля 2023 г. в Вятском государственном университете состоялась XVIII Всероссийская научно-практическая конференция с международным участием «Экология родного края: проблемы и пути их решения».

Организаторами конференции выступили Вятский государственный университет (ВятГУ), Институт биологии Коми научного центра Уральского отделения РАН, Филиал «КЧХК» АО «ОХК «УРАЛХИМ» в г. Кирово-Чепецке, Кировское отделение № 8612 ПАО «Сбербанк», Министерство охраны окружающей среды Кировской области, Министерство лесного хозяйства Кировской области, Общественная палата Кировской области, Вятская торгово-промышленная палата.

24 апреля 2023 г. в Инженериуме ВятГУ началась работа конференции с молодёжных мероприятий: регионального молодёжного конкурса «Мой любимый город», посвящённого 650-летию г. Кирова; выставки проектов благоустройства городской среды «Скверы г. Кирова», посвящённой 650-летию г. Кирова; деловой игры «Кто приберётся в твоём лесу?».

В 2023 г. состоялся второй этап регионального молодёжного конкурса «Мой любимый город», посвящённый 650-летию г. Кирова. Студенты кировских вузов, учащиеся школ, гимназий и лицеев представили проекты, посвящённые благоустройству городских территорий, изучению истории и архитектуры города, оценке экологического состояния городской среды, проектированию современной одежды на основе традиционных промыслов Вятки, созданию продукции, обогащённой биологически активными веществами и др. Все участники, представившие свои работы на конкурсе, получили сертификаты. Памятные призы и дипломы победителям конкурса вручила помощник Управляющего Кировским отделением № 8612 ПАО Сбербанк Н.В. Храпова.

При поддержке Министерства лесного хозяйства Кировской области состоялась деловая игра «Кто приберётся в твоём лесу?», в которой приняли участие школьники из школьных лесничеств Кировской области, студенты ВятГУ, представители Министерства лесного хозяйства Кировской области, Администрации города Кирова и АО «Куприт». В ходе игры

участники обсуждали разные способы решения проблемы несанкционированных свалок в лесах области.

В зале была организована выставка проектов благоустройства городской среды «Скверы г. Кирова», посвящённая 650-летию г. Кирова. Проекты выполнены студентами ВятГУ под руководством Д.В. Патрушева – члена Союза Художников России, старшего преподавателя кафедры дизайна и изобразительного искусства ВятГУ.

25 апреля начала работу традиционная XVIII Всероссийская научно-практическая конференция с международным участием «Экология родного края: проблемы и пути их решения». На открытии конференции с приветственным словом выступили зам. председателя Кировской городской думы Л.А. Копысова, ректор ВятГУ В.Н. Пугач, зам. министра охраны окружающей среды Кировской области О.В. Женихова, зам. директора ИБ ФИЦ Коми НЦ УрО РАН Б.М. Кондратёнок, председатель Общественной Палаты Кировской области С.Н. Улитин, Председатель комитета по экологии и природопользованию Законодательного Собрания Кировской области, зам. директора по персоналу и коммуникациям филиала «КЧХК» АО «ОХК «УРАЛХИМ» в г. Кирово-Чепецке Е.А. Перминова, вице-президент Союза «Вятская торгово-промышленная палата» Л.И. Перминов, первый зам. ген. директора АО «Куприт» Д.А. Невенченков. На открытии конференции была отмечена актуальность вопросов экологии в современном мире, необходимость проведения комплексных экологических исследований, проводимых специалистами разных профилей в разных регионах России и других стран для решения современных экологических проблем.

На пленарном заседании доклады представили: зам. министра охраны окружающей среды Кировской области О.В. Женихова «Реализация национального проекта «Экология» на территории Кировской области»; д. б. н., профессор, зав. отделом экологии и ресурсоведения Всероссийского научно-исследовательского института охотничьего хозяйства и звероводства имени профессора Б.М. Житкова Т.Л. Егошина «Недревесные ресурсы лесов Кировской области»; главный

хранитель фондов Кировского городского зоологического музея В.Н. Сотников «Предложения к списку охраняемых видов позвоночных животных в Красную книгу Кировской области»; директор Государственного природного заповедника «Нургуш» Е.М. Тарасова «Проблема отбора видов для Красной книги Кировской области: флористический аспект»; д. с.-х. н., директор Федерального научного центра пчеловодства, ФАНЦ Северо-Востока им. Н. В. Рудницкого А.З. Брандорф «Пчеловодство в Кировской области: состояние проблемы и пути решения»; к. б. н., с. н. с. НИЛ биомониторинга ИБ ФИЦ Коми НЦ УрО РАН и ВятГУ Е.В. Даббах «Почвы на двучленных отложениях в центральной части Кировской области»; д. т. н., профессор, зав. НИЛ биомониторинга ИБ ФИЦ Коми НЦ УрО РАН и ВятГУ Т.Я. Ашихмина «Проблемы загрязнения водных объектов Кировской области, пути решения»; к. т. н., с. н. с. НИЛ биомониторинга ИБ ФИЦ Коми НЦ УрО РАН и ВятГУ Г.Я. Кантор, к. х. н., доцент, с. н. с. НИЛ биомониторинга ИБ ФИЦ Коми НЦ УрО РАН и ВятГУ Н.В. Сырчина «Что такое потенциал глобального потепления?».

На секционных заседаниях продолжилась работа конференции, доклады были представлены в очном формате и онлайн. На конференции работали 8 секций: экологические проблемы региона; экологический мониторинг состояния окружающей среды; биология и экология растений; биология и экология животных; химия и экология почв; экология микроорганизмов; отходы произ-

водства и потребления: экологические аспекты; экологическое образование, воспитание и просвещение. На секционных заседаниях участниками конференции было заслушано 50 докладов.

Всего в конференции приняли участие более 450 человек из 38 городов России и 4 стран (Беларусь, Молдова, Узбекистан, Вьетнам). По итогам конференции опубликовано 221 статья в двух сборниках материалов конференции:

«Экология родного края: проблемы и пути их решения: материалы XVIII Всероссийской научно-практической конференции с международным участием». Книга 1. Киров: Вятский государственный университет, 2023. 439 с.

«Экология родного края: проблемы и пути их решения: материалы XVIII Всероссийской научно-практической конференции с международным участием». Книга 2. Киров: Вятский государственный университет, 2023. 451 с.

Сборники материалов и программа конференции размещены на сайте: <http://envjournal.ru/ecolab/sbr.php>.

*Т. Я. Ашихмина, председатель оргкомитета конференции, д. т. н., профессор, г. н. с., зав. НИЛ биомониторинга ИБ ФИЦ Коми НЦ УрО РАН и ВятГУ*  
*С. Ю. Огородникова, ответственный секретарь конференции, к. б. н., доцент, с. н. с. НИЛ биомониторинга ИБ ФИЦ Коми НЦ УрО РАН*

# XVIII Всероссийская научно-практическая конференция с международным участием «Экология родного края: проблемы и пути их решения»



Индекс ПС248



I S S N 1 9 9 5 - 4 3 0 1



9 7 7 1 9 9 5 4 3 0 0 0 4