



2023

*Теоретическая
и прикладная*

ЭКОЛОГИЯ

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

№ 1

**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>



НАЦИОНАЛЬНЫЙ ПРОЕКТ «ЭКОЛОГИЯ» ФЕДЕРАЛЬНЫЙ ПРОЕКТ «ЧИСТАЯ СТРАНА»



Министерство охраны окружающей среды Кировской области в рамках национального проекта «Экология», федерального проекта «Чистая страна» ведётся работа по реализации нескольких направлений в сфере обращения с отходами.

*И.о. Министра охраны окружающей среды Кировской области
А.В. Албегова*

В 2020 г. рекультивирована свалка в пгт Вахруши, в 2022 г. завершены работы по рекультивации свалки в г. Слободском.



Рекультивация «на месте»
Площадь – 4,7 га
Население – 9,9 тыс. чел.
Объём отходов – 81,1 тыс. м³

Рекультивация «на месте»
Площадь – 6,7 га
Население – 33,7 тыс. чел.
Объём отходов – 266,6 тыс. м³

В настоящее время в стадии реализации ещё 4 свалки, в том числе:

Свалка	г. Киров	г. Омутнинск	г. Малмыж	г. Малмыж (р. Засора)
Реализация, годы	2023–2024	2023–2024	2022–2023	2023
Стоимость, млн руб.	2163	339,8	98	6,5
Рекультивация	«на месте»	вывоз на полигон	«на месте»	вывоз на полигон
Площадь, га	27,7	3,5	4,7	1,1
Население, тыс.чел.	518	21,8	7	7
Объём отходов, тыс. м ³	3170	81,6	81,1	2,2

На территории Кировской области функционирует 15 объектов размещения отходов. Ежегодный объём образования ТКО составляет 283,3 тыс. т. Мощность полигонов составляет не менее 350,0 тыс. т ТКО в год. К 2030 г. 12 полигонов будут выведены из эксплуатации. Взамен «старым» полигонам планируется строи-

тельство современных объектов размещения по сортировке и переработке отходов. Один из них – комплексный объект по обращению с ТКО (КПО «Центральный»), в областном центре, мощностью 200,0 тыс. т/год; и три КПО в Нолинском, Вятскополянском и Яранском районах мощностью по 20,0 тыс. т.



**Теоретическая
и прикладная
ЭКОЛОГИЯ**
№ 1, 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 (№ 2322 по состоянию на 07.03.2023).

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., старший 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: 28.03.2023. Тираж 250 экз. Заказ № 0432. Цена свободная.

Отпечатано в ООО «Кировская цифровая типография» Адрес типографии: 610017, Кировская область, г. Киров, ул. Анфисы Горбуновой, 23

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. Доронников** к.с.-х.н., доцент, научный сотрудник Университета Гёттингена им. Георга Августа (Германия)
- 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
- В.Л. Коваленко** к.т.н., доцент, доцент Украинского государственного химико-технологического университета
- Е.Ю. Колбовский** д.г.н., профессор, ведущий научный сотрудник Московского государственного университета им. М.В. Ломоносова
- Э.И. Коломиец** д.б.н., академик НАН Беларуси, 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. Лаженцев** 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 Цзилиньского 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
- Б.Н. Хойницки** д.б.н., профессор Познаньского университета наук о жизни (Польша)
- В.И. Холстов** д.х.н., профессор, руководитель центра ФГУП «ГосНИИОХТ»
- М.Х. Хусейн** д.б.н., профессор Университета Ассиут (Египет)
- В.Т. Юнгблюд** д.и.н., профессор, президент Вятского государственного университета



Theoretical and Applied ECOLOGY

No. 1, 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, Senior 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 ПС248 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: March 28, 2023.
Circulation 250 copies. Order No. 0432. Free price.

"Kirov digital printing house", LTD
Printing Address: 23, Anfisy Gorbunovoy St., Kirov, Russia, 610017

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)
- 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
- V.L. Kovalenko** PhD in Technical Sciences, Associate Professor, Associate Professor of Ukrainian State University of Chemical Technology
- E.Yu. Kolbovsky** Doctor in Geography, Leading Researcher, Professor, Professor of Lomonosov Moscow State University
- E.I. Kolomiyyets** 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
- AA. 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"
- B.H. Chojnicki** Doctor in Biology, Professor of Poznan University of Life Sciences (Poland)
- M.H. Hussein** Doctor in Biology, Professor of Assiut University (Egypt)
- V.T. Yungblud** Doctor in History, Professor, President of Vyatka State University

СОДЕРЖАНИЕ

ОБЗОРЫ

- С. Г. Скугорева, Л. И. Домрачева, Л. В. Трефилова, П. А. Стариков, Т. Я. Ашихмина* Биозащита древесины от микробных повреждений (обзор)6

СТАТЬИ

- М. М. Sanjerehei* Sample size and power calculations for nonparametric tests in vegetation research16
B. Sánchez-Díaz, L. Ríos-Rodas, A. Sol-Sanchez, A. del Rosario Fraire-Vazquez, J. del Carmen Geronimo-Torres, R. Solís-Silvan Modeling of the vertical structure of shade trees in cacao agroforestry systems28

- Т. Я. Ашихмина, Г. Я. Кантор, А. С. Тимонов, Е. А. Домнина, Е. В. Дабах, Н. В. Сырчина, Л. В. Кондакова, Т. И. Кутявина, С. Г. Скугорева, С. Ю. Огородникова, В. В. Рутман, Д. А. Кузнецов* Мониторинг атмосферного воздуха в районе предприятий по утилизации опасных промышленных отходов38
В. С. Тихунов, С. К. Белоусов Интегральная характеристика качества атмосферного воздуха городов Европы47
Е. М. Перминова, Н. Н. Бондаренко, Т. Н. Щемелинина, Е. М. Лаптева Биохимическая активность подзолистых почв на вырубках среднетаёжных еловых лесов56

- А. Ф. Осипов, В. В. Старцев, А. С. Прокушкин, А. А. Дымов* Запасы углерода в почвах лесов Красноярского края: анализ роли типа почвы и древесной породы67
Е. В. Яковлева, Д. Н. Габов Аккумуляция полиаренов в высших растениях бугристых болот южной и северной тундры75
А. С. Петухов, Т. А. Кремлева, Н. А. Хритохин, Г. А. Петухова Статистический анализ взаимосвязи накопления тяжёлых металлов и биохимических реакций растений в условиях городской среды83

- Д. В. Виноградов, М. П. Макарова, Т. В. Зубкова* Применение удобрительных смесей на основе осадков сточных вод и цеолита в агроценозах масличных культур93
И. Г. Широких, Н. А. Боков, Н. Е. Завьялова, Т. Я. Ашихмина Компост из куриного помёта как источник устойчивости почвенных актиномицетов к антибиотикам101
Т. И. Письман, И. Ю. Ботвич, М. Г. Ерунова, Д. В. Емельянов, Н. А. Огородов, А. А. Шпедт, А. П. Шевырногов Оценка засорённости посевов пшеницы по геоботаническому, наземным спектрометрическим и спутниковым данным110

- I. S. Nekrasov, A. G. Selyukov* Size-age and histomorphological indicators of the Arctic grayling (*Thymallus arcticus*) of Putorana Nature Reserve117
R. E. Belogurova Morphological variation in round goby, *Neogobius melanostomus* (Actinopterygii, Gobiidae) from the Black Sea125
Н. Н. Назаренко, И. Д. Свистова Микроскопические грибы в почвах лесных экосистем Воронежского государственного природного биосферного заповедника133

ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ
ПРОБЛЕМЫ
ЭКОЛОГИИ

МЕТОДОЛОГИЯ
И МЕТОДЫ
ИССЛЕДОВАНИЙ.
МОДЕЛИ
И ПРОГНОЗЫ

МОНИТОРИНГ
ПРИРОДНЫХ
И АНТРОПОГЕННО
НАРУШЕННЫХ
ТЕРРИТОРИЙ

ХИМИЯ ПРИРОДНЫХ
СРЕД И ОБЪЕКТОВ

АГРОЭКОЛОГИЯ

ПОПУЛЯЦИОННАЯ
ЭКОЛОГИЯ

ЭКОЛОГИЗАЦИЯ ПРОИЗВОДСТВА	<i>С. А. Двинских, О. В. Ларченко, М. А. Оськина</i> Разработка системы экологических индикаторов, отражающих водохозяйственные аспекты предприятия в свете устойчивого развития 140 <i>Е. А. Татаринцева, О. А. Арефьева, Л. Н. Ольшанская, А. А. Петров, Ф. Бугерара</i> Извлечение ионов меди и цинка из сточных вод сорбентом на основе хитозана 148
РЕМЕДИАЦИЯ И РЕКУЛЬТИВАЦИЯ	<i>Л. В. Мосина, Ю. А. Холопов, Ю. А. Жандарова</i> Фитоэкстракция свинца и кадмия из почвогрунтов полигонов отходов некоторыми сельскохозяйственными культурами 154 <i>Л. М. Шапошникова, О. В. Раскоша, Н. Г. Рачкова</i> Фиторемедиационный потенциал иван-чая узколистного и канареечника тростниковидного в условиях полиэлементного загрязнения 162
ЭКОЛОГИЯ И КЛИМАТ	<i>В. А. Кузьмин, И. А. Заграй, Н. А. Шмакова</i> Влияние промышленных выбросов предприятий теплоэнергетики на поглощение солнечного излучения в атмосфере 170
СОЦИАЛЬНАЯ ЭКОЛОГИЯ	<i>П. П. Баттахов</i> Защита окружающей среды при добыче полезных ископаемых в Арктике: правовые аспекты 179 <i>Е. А. Малкова, Е. В. Михеева, И. А. Кушяев</i> К оценке вероятности роста первичной заболеваемости населения в условиях природной биогеохимической провинции, не вызывающей эндемий 186
ХРОНИКА	Юбилей Василия Алексеевича Сысуева 194 Журналу «Теоретическая и прикладная экология» исполнилось 15 лет 195

CONTENTS

REVIEWS

THEORETICAL PROBLEMS OF ECOLOGY	<i>S. G. Skugoreva, L. I. Domracheva, L. V. Trefilova, P. A. Starikov, T. Ya. Ashikhmina</i> Bioprotection of wood from microbial damage (review) 6
--	---

ARTICLES

METHODOLOGY AND RESEARCH METHODS. MODELS AND FORECASTS	<i>M. M. Sanjerehei</i> Sample size and power calculations for nonparametric tests in vegetation research 16 <i>B. Sánchez-Díaz, L. Ríos-Rodas, A. Sol-Sanchez, A. del Rosario Fraire-Vazquez, J. del Carmen Geronimo-Torres, R. Solís-Silvan</i> Modeling of the vertical structure of shade trees in cacao agroforestry systems 28
MONITORING NATU- RAL AND ANTHRO- POGENICALLY DIS- TURBED AREAS	<i>T. Ya. Ashikhmina, G. Ya. Kantor, A. S. Timonov, E. A. Domnina, E. V. Dabakh, N. V. Syrchina, L. V. Kondakova, T. I. Kutjavina, S. G. Skugoreva, S. Yu. Ogorodnikova, V. V. Rutman, D. A. Kuznetsov</i> Atmospheric air monitoring in the area of enterprises for the disposal of hazardous industrial waste 38 <i>V. S. Tikunov, S. K. Belousov</i> Integral classification of air quality in European cities 47 <i>E. M. Perminova, N. N. Bondarenko, T. N. Shchemelinina, E. M. Lapteva</i> Biochemical activity of podzolic soils at the cuttings in middle taiga spruce forest 56

**CHEMISTRY
OF NATURAL
ENVIRONMENTS
AND OBJECTS**

- A. F. Osipov, V. V. Startsev, A. S. Prokushkin, A. A. Dymov* Carbon stocks in forest soils of the Krasnoyarsk Region: analysis of soil and tree species role67
- E. V. Yakovleva, D. N. Gabov* Accumulation of polyarenes in higher plants of hummock peatlands in the southern and northern tundra75
- A. S. Petukhov, T. A. Kremleva, N. A. Khritokhin, G. A. Petukhova* Statistical analysis of the relationship between heavy metal accumulation and plants biochemical responses in the urban area83

AGROECOLOGY

- D. V. Vinogradov, M. P. Makarova, T. V. Zubkova* The use of fertilizer mixtures based on sewage sludge and zeolite in oilseed agrocenoses93
- I. G. Shirokikh, N. A. Bokov, N. E. Zavyalova, T. Ya. Ashikhmina* Compost from chicken manure as a source of antibiotic resistance of soil actinomycetes 101
- T. I. Pisman, I. Y. Botvich, M. G. Erunova, D. V. Emelyanov, N. A. Ogorodov, A. A. Shpedt, A. P. Shevyrnogov* Wheat crops weediness assessment based on geobotanical, ground and satellite spectral data 110

**POPULATION
ECOLOGY**

- I. S. Nekrasov, A. G. Selyukov* Size-age and histomorphological indicators of the Arctic grayling (*Thymallus arcticus*) of Putorana Nature Reserve117
- R. E. Belogurova* Morphological variation in round goby, *Neogobius melanostomus* (Actinopterygii, Gobiidae) from the Black Sea125
- N. N. Nazarenko, I. D. Svistova* Microscopic fungi in the soils of forest ecosystems of the Voronezh State Natural Biosphere Reserve133

**ECOLOGIZATION
OF PRODUCTION**

- S. A. Dvinskikh, O. V. Larchenko, M. A. Oskina* Developing a system of environmental indicators reflecting the water management aspects of an enterprise in the light of sustainable development 140
- E. A. Tatarintseva, O. A. Arefieva, L. N. Olshanskaya, A. A. Petrov, F. Bugerara* Extraction of copper and zinc ions from wastewater by a sorbent based on chitosan 148

**REMEDICATION
AND RECULTIVATION**

- L. V. Mosina, Yu. A. Kholopov, Yu. A. Zhandarova* Phytoextraction of lead and cadmium from soils of landfills by some agricultural crops 154
- L. M. Shaposhnikova, O. V. Raskosha, N. G. Rachkova* Phytoremediation potential of willow herb and reed canary grass under conditions of polyelemental pollution 162

**ECOLOGY AND
CLIMATE CHANGE**

- V. A. Kuzmin, I. A. Zagrai, N. A. Shmakova* Influence of industrial emissions from heat power engineering enterprises on the absorption of solar radiation in the atmosphere 170

SOCIAL ECOLOGY

- P. P. Battakhov* Environmental protection during mining in the Arctic: legal aspects179
- E. A. Malkova, E. V. Mikheeva, I. A. Kshnyasev* To estimation of the probability of human primary incidence growth in the conditions of a natural biogeochemical province without endemic diseases 186

CHRONICLE

- Anniversary of Vasily Alekseevich Sysuev 194
- Journal "Theoretical and Applied Ecology" is 15 years old 195

Биозащита древесины от микробных повреждений (обзор)

© 2023. С. Г. Скугорева¹, к. б. н., н. с., Л. И. Домрачева^{1,2}, д. б. н., профессор,
Л. В. Трефилова², к. б. н., доцент, П. А. Стариков², аспирант,
Т. Я. Ашихмина^{1,3}, д. т. н., профессор, г. н. с., зав. лабораторией,

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

²Вятский государственный агротехнологический университет,
610017, Россия, г. Киров, Октябрьский проспект, д. 133,

³Вятский государственный университет,
610000, Россия, г. Киров, ул. Московская, д. 36,
e-mail: skugoreva@mail.ru, dli-alga@mail.ru

Проведён обзор и анализ литературных данных о применении биометодов в защите древесины от действия микроорганизмов-деструкторов. Важную роль в защите древесины от деструкции играют такие микробы-антагонисты, как цианобактерии, бациллы и микромицеты р. *Trichoderma*. Их антагонистическая активность против микробов-биоразрушителей связана с синтезом летучих и нелетучих антибиотиков, липопептидов и ферментов-гидролаз, разрушающих те или иные компоненты клеток микробов-деструкторов или нарушающих процессы их метаболизма.

Многие природные соединения растительного (эфирные масла, танины, экстрактивные вещества древесины) и животного происхождения (прополис, хитозан) обладают большим потенциалом в биозащите древесины от биоповреждений благодаря своему уникальному природному составу, который приводит к нарушению жизнедеятельности микробов-деструкторов. Преимуществами природных соединений перед синтетическими антисептиками является их возобновляемость, рентабельность получения из отходов, нетоксичность и безвредность для окружающей среды. Недостатки, ограничивающие использование природных антисептиков: высокая гетерогенность в зависимости от источника, из которого они получены, лёгкое выщелачивание, неравномерная активность против отдельных видов грибов, высокая восприимчивость к биоразложению. Некоторые из этих недостатков можно преодолеть, сочетая органические биоциды с другими консервантами древесины.

Краткий обзор литературных данных показывает, что наряду с химическими методами защиты древесины от биоповреждений целесообразно использовать и биологические методы, которые хотя и уступают по эффективности первым, однако не оказывают вредного воздействия на окружающую среду. Особенно эффективным может оказаться совместное использование синтетических и природных антисептиков.

Ключевые слова: древесина, биоповреждения, биозащита, антисептики микробного, растительного и животного происхождения.

Bioprotection of wood from microbial damage (review)

© 2023. S. G. Skugoreva¹ ORCID: 0000-0002-5902-5187^{*}

L. I. Domracheva^{1,2} ORCID: 0000-0002-7104-3337^{*}, L. V. Trefilova² ORCID: 0000-0002-9932-5803^{*}

P. A. Starikov² ORCID: 0000-0002-3205-6696^{*}, T. Ya. Ashikhmina^{1,3} ORCID: 0000-0003-4919-0047^{*}

¹Institute of Biology of the Komi Science Centre of the Ural Branch
of the Russian Academy of Sciences,

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

²Vyatka State Agrotechnological University,
133, Oktyabrskiy Prospekt, Kirov, Russia, 610017,

³Vyatka State University,

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

e-mail: skugoreva@mail.ru, dli-alga@mail.ru

mycetes of g. *Trichoderma* play an important role in protecting wood from destruction. Their antagonistic activity against biodegrading microbes is associated with the synthesis of volatile and nonvolatile antibiotics, lipoproteins and hydrolase enzymes that destroy certain components of cells of wood-destructing microbes or disrupt their metabolic processes.

Many natural compounds of vegetable (essential oils, tannins, extractive substances of wood) and animal origin (propolis, chitosan) have great potential in the bioprotection of wood from biodamage, due to their unique natural composition, which leads to disruption of the vital activity of destructor microbes. The advantages of natural compounds over synthetic antiseptics are their renewability, cost-effectiveness of obtaining from waste, non-toxicity and environmental friendliness. Disadvantages that limit the use of natural antiseptics are high heterogeneity depending on the source from which they are obtained, easy leaching, uneven activity against certain fungal species, high susceptibility to biodegradation. Some of these shortcomings can be overcome by combining organic biocides with other wood preservatives.

A brief review of the literature data shows that, along with chemical methods of protecting wood from biodamage, it is advisable to use biological methods, which, although inferior in efficiency to the first, do not have a harmful effect on the environment. The combined use of synthetic and natural antiseptics can be especially effective.

Keywords: wood, biodamage, biosecurity, antiseptics of microbial, plant and animal origin.

Использование изделий из древесины насчитывает несколько тысячелетий. И в наше время, несмотря на появление огромного количества искусственных материалов, интерес к подобным изделиям не угасает. Древесина не заменима при строительстве жилых и производственных зданий, изготовлении мебели, плавающих конструкций, спортивного инвентаря, детских игрушек и т. д. Однако по-прежнему человечество сталкивается с проблемой порчи деревянных изделий из-за совокупности действующих на неё абиотических и биотических факторов: влажности, кислотности среды, солевых и температурных воздействий, микробов-деструкторов и т. п. Проблема биоповреждения древесины, которая уже не является растущим деревом, а включена в производство, связана с тем, что целлюлоза – прекрасный органический субстрат, пища для различных групп микроорганизмов, в первую очередь, грибов. Воздействие микроорганизмов провоцирует появление различных разноцветных пятен, покрытие поверхности плесенью, что приводит к снижению прочности древесины [1]. Микробные популяции в биоматериале могут быть очень разнообразными, что зависит от факторов внешней среды, возраста древесины, условий хранения, температуры, влажности, состава эпифитов живого дерева и т. д. Поэтому необходима разработка комплекса мероприятий, основанных как на изучении механизма воздействия на древесину её разрушителей, так и на подборе биопрепаратов и соединений, способных остановить активность разрушителей древесины.

В настоящее время разработаны методики выделения, культивирования и последующего изучения физиологии и биохимии дереворазрушающих, деревоокрашивающих грибов и бактерий для более глубокого исследования их реакций на действие различных антисептиков [2].

Подобные работы облегчают поиск и испытание наиболее надёжных, эффективных и по возможности дешёвых способов защиты древесины от губительных для неё факторов. Безусловно, в большей степени используются способы защиты древесины, основанные на применении различных антисептиков, механизм действия которых обусловлен блокированием микробных ферментов, вызывающих деструкцию древесины [3]. Среди защитных антисептиков в последние годы распространение получили препараты, синтезируемые из промышленных отходов различных производств [4, 5].

Наряду с этим появляется всё больше сведений об использовании органических соединений растительного и животного происхождения, а также использования биопрепаратов, содержащих культуры микробов-антагонистов, нарушающих деструктивный потенциал разрушителей древесины.

Цель данной работы – обзор и анализ литературных данных о возможности применения биологических методов в защите древесины от действия микроорганизмов-деструкторов.

Объекты и методы исследования

Для написания обзора использованы литературные источники с 1993 по 2022 гг. из базы данных научной электронной библиотеки. Обсуждаются и анализируются публикации ведущих отечественных и зарубежных учёных-исследователей о роли микробов-разрушителей древесины и бактерий-антагонистов, проявляющих способность к биозащите древесины от биоповреждений благодаря своей способности нарушать жизнедеятельность микробов-деструкторов.

Поиск источников проводили при помощи поисковых систем Яндекс и Google, а также на сайте eLIBRARY.RU по поисковым запросам:

«микробные повреждения древесины», «фитопатогены древесины», «микробы-деструкторы древесины», «микробы-антагонисты», «защита древесины», «эфирные масла», «дубильные вещества», «экстрактивные вещества», «хитозан», «прополис».

Микробы – потенциальные агенты в защите древесных изделий от разрушения

Биоповреждение древесины провоцируется не только микробами-сапрофитами, но и микробами-оппортунистами, которые в отсутствие живых растений способны в качестве источника питания переходить на использование мёртвой древесины. Древесина, используемая людьми для приготовления различных изделий, представляет в этом плане полноценный субстрат питания для многих групп микроорганизмов. Вероятно, остановку размножения и развития подобных целлюлозолитиков способны осуществлять те же группы микроорганизмов, которые используют для борьбы с фитопатогенами.

Обзор литературных данных показывает, что наиболее перспективными в этом плане можно считать следующие группы антагонистов: цианобактерии, бациллы и микромицеты р. *Trichoderma*, которых объединяет несколько общих особенностей. К их числу относятся высокая степень адаптации к стрессовым условиям внешней среды; достаточно высокие темпы размножения многих видов; наличие особых морфологических структур, обеспечивающих переживание неблагоприятных условий; выделение экзометаболических веществ, нарушающих жизненные процессы чужеродных спутников. Поэтому в данном обзоре мы остановимся только на этой группе микробов-антагонистов.

Среди цианобактерий наивысшая способность к синтезу антагонистических метаболитов отмечается у представителей родов *Phormidium*, *Microcoleus*, *Fischerella*, *Nostoc*, *Anabaena* [6–11]. Среди экзометаболических веществ встречаются полипептиды, аминокислоты, полисахариды, органические кислоты, алкалоиды, антибиотики [12]. В частности, к числу цианобактериальных экзометаболических антагонистов относятся липопептиды, выделенные из наземной цианобактерии *Nostoc commune*. Из экскретов *Fischerella ambigua* выделен циклический полимер парсигин и алкалоиды амбигол А и амбигол В, обладающие антигрибной активностью. Антигрибная активность отмечена и для другой цианобактерии этого рода

F. muscicola [13–18]. Способностью выделять вещества антибактериальной и антигрибной активности обладают не только отдельные виды цианобактерий, но и природные бактериальные сообщества. Показано, например, что в культуральной среде подобных сообществ находятся насыщенные, ненасыщенные и ароматические углеводороды, карбоновые кислоты, фенольные и терпеновые соединения и их производные [19].

Кроме того, особенность физиологии цианобактерий заключается ещё и в том, что их экзометаболические продукты являются местом размножения целого ряда сапротрофных бактерий, многие из которых обладают антагонистическими свойствами, при этом их биомасса может составлять от 3 до 12% биомассы цианобактерий [20].

Виды грамположительных бактерий р. *Bacillus* известны как наиболее используемые в биотехнологических производствах с целью получения биопрепаратов и метаболитов, применяемых в медицине, ветеринарии, сельском хозяйстве, пищевой промышленности. Так, одним из достоинств бактерий этого рода является способность к спорообразованию в неблагоприятных условиях и, следовательно, возможность длительного хранения бактериальных культур или биопрепаратов без потери полезных свойств. Выявлены важные для биозащиты от разрушения свойства бацилл. К ним, в частности, можно отнести способность синтезировать и выделять в окружающую среду липопептиды [21]. Липопептиды бацилл очень многообразны, устойчивы к гидролизу чужеродными пептидазами, нечувствительны к окислению и действию высоких температур. Антибиотические свойства бациллярных липопептидов связывают с их способностью нарушать проницаемость цитоплазматической мембраны микробных клеток, формировать в ней поры и, в конечном итоге, разрушать микробную клетку [22–24]. Особый акцент антибиотической активности липопептидов бацилл делается на снижении деструкционной активности фузариев, способных разрушать как живую, так и мёртвую древесину [24]. Эффективность антифузариозного контроля с помощью бацилл базируется не только на синтезе антибиотиков, но и способности бактерий данного рода к продуцированию литических экзоферментов (хитиназы, протеазы, глюканызы), разрушающих клеточную стенку грибов [25].

Изучение возможности использования бацилл-антагонистов для биоконтроля грибов,

разрушающих сырую древесину, выявило их способность к синтезу миколитических ферментов и проявление морфологических изменений грибов-разрушителей в формировании на развивающихся гифах сферопластов [26].

Среди представителей этого рода особое место занимает *B. subtilis*, биохимическим особенностям, а также антибактериальным, антигрибным, противовирусным способностям которой посвящены десятки работ. В частности, в ряде обзоров подчёркивается, что состав химических соединений, выделяемых *B. subtilis*, определяется её генетическими особенностями и условиями окружающей среды. Способность к синтезу вторичных метаболитов, таких как липопептидные антибиотики, позволяет данному виду бацилл действовать угнетающе более чем на 20 видов фитопатогенов [27–29]. К числу таких антибиотиков относятся сурфактин, микосубтилин, итурин, бацилломицин, действие которых на грибные и бактериальные клетки проявляется в формировании ионопроницаемых пор в цитоплазматической мембране угнетаемых клеток [30–32].

Микромицеты р. *Trichoderma* давно известны как активные продуценты широкого спектра биологически активных веществ, включая экзоферменты, разрушающие полимеры различного происхождения [33–36]. Препараты на основе грибов р. *Trichoderma* используются для защиты круглого леса: *T. harzianum* и *T. lignorum* подавляют развитие плесневых грибов на поверхности сырой древесины [4].

Биологическое снижение воздействия фитопатогенов, в том числе, дереворазрушающих грибов, представители р. *Trichoderma* осуществляют путём прямого паразитизма, конкуренции и синтеза антибиотических соединений, при этом во многом данные механизмы являются взаимодополняющими и действуют синергично [37]. Представители *Trichoderma* spp. продуцируют широкий спектр антимикробных соединений, в том числе ферменты, разрушающие клеточную стенку мишени, сидерофоры, хелатирующие железо, а также значительное количество летучих и нелетучих антибиотиков [38]. Выявлен штамм *T. viride*, выделяющий водорастворимые антибиотики, подавляющие развитие биодеструкторов родов *Aspergillus*, *Penicillium*, *Cladosporium*, *Chaetomium* [39]. Не только водорастворимые антибиотики, но и ряд летучих органических соединений, продуцируемых триходермой, например, альдегидной природы (гептаналь и октаналь),

способны проявлять антимикотическую активность в условиях *in vitro* [40].

При этом, синтез и, как следствие, антимикробная активность таких соединений зависит от условий культивирования, в частности, от питательной среды. Например, при выращивании на солодовом агаре летучие соединения триходермы оказывали ингибирующее влияние на все исследованные тест-культуры, в то время как эффект был незначительным при культивировании на минимальной агаровой среде [41].

Таким образом, антагонистическая активность цианобактерий, бацилл и триходермы против микробов-биоразрушителей древесины имеет сходные механизмы, связанные с синтезом летучих и нелетучих антибиотиков, липопротеидов и ферментов-гидролаз, разрушающих те или иные компоненты клеток микробов-деструкторов или нарушающих процессы их метаболизма.

Вещества растительного происхождения, защищающие древесину

В защите древесины от микробных повреждений особая роль принадлежит веществам растительного происхождения. Высокой антагонистической активностью обладают такие вещества вторичного происхождения, как эфирные масла, танины, экстрактивные вещества древесины, которые можно рассматривать в качестве альтернативы химическим антисептикам.

Эфирные масла, образуемые растениями, – летучие, с характерным сильным запахом и вкусом, маслянистые, нерастворимые в воде, в основном бесцветные или слабоокрашенные жидкости. Имеют чрезвычайно сильные физиологические и фармакологические свойства. Установлена высокая противогрибковая эффективность масел бедренца анисового (*Pimpinella anisum*), базилика душистого (*Ocimum basilicum*), тмина обыкновенного (*Carum carvi*), душицы обыкновенной (*Origanum vulgare*), тимьяна обыкновенного (*Thymus vulgaris*) [42], коричника цейлонского (*Cinnamomum zeylanicum*) [43], членобородника лимонного (*Cymbopogon citratus*), пеларгонии ароматной (*Pelargonium graveolens*), гвоздичного дерева (*Syzygium aromaticum*) [44], сосны жёсткой (*Pinus rigida*), эвкалипта камальдурского (*Eucalyptus camaldulensis*) [45], нима индийского (*Azadirachta indica*) [46]. Она обусловлена присутствием в маслах монотерпенов: β-цитронеллола, карвакрола, цитраля,

эвгенола, изоэвгенола, гераниола, тимола, коричневого и α -метилкоричного альдегидов, 2-метилкоричной кислоты, α -кадинола, элемола и азадирахтина [47]. Недостатком использования масел является то, что они легко выщелачиваются из древесины, что делает их непригодными для защиты древесины, эксплуатируемой на открытом воздухе [43].

Танины. Танины или дубильные вещества – это полифенольные природные соединения, вырабатываемые большинством высших растений для защиты их от патогенных микроорганизмов и насекомых. Хвойные деревья считаются главным источником танинов [48]. Высокая противогрибковая активность установлена для экстрактов из коры сосны приморской (*Pinus pinaster*), сосны калабрийской (*Pinus brutia*), пихты Нордмана (*Abies nordmanniana*), казуарины хвощевидной (*Casuarina equisetifolia*) [49], из листьев дуба валония (*Quercus macrolepis*) [50].

Недостаток использования танинов как антисептиков – их плохая фиксация в структуре древесины и быстрое выщелачивание. Для закрепления танинов в клеточной стенке древесины могут быть использованы отвердители, например, гексамин, химическая модификация танинов и удаление низкомолекулярных соединений путём диализа [51].

Экстрактивные вещества древесины. Некоторые породы древесины обладают высокой естественной устойчивостью к гниению из-за присутствия различных экстрактивных веществ, которые представляют собой разнообразные неструктурные компоненты древесины, вырабатываемые в качестве защиты от стрессов, в основном находящиеся в сердцевине древесины. Их можно разделить на две группы: алифатические, алициклические соединения (терпеноиды и терпены) и фенольные соединения (флавоноиды и дубильные вещества). Их противогрибковая эффективность может быть основана на различных механизмах, включая прямое взаимодействие с ферментами грибов, нарушение структуры клеточных стенок и клеточных мембран или антиоксидантную активность [52, 53].

Потенциально промышленные отходы от обработки прочных пород древесины могут служить источником натуральных коммерчески выгодных биоцидов, которые можно использовать для обработки менее прочной древесины.

Высокой прочностью и устойчивостью к грибковому разложению характеризуется тиковое дерево (*Tectona grandis*) за счёт таких

экстрактивных соединений, как антрахиныны, тектохиноны, дезоксилапахол, изолапахол и дегидротектол [54, 55].

Устойчивость непрочной сердцевины ели европейской (*Picea abies*) к бурой гнили обусловлена наличием фунгитоксичной гидрофобной смолы, а среднепрочной сердцевины лиственницы курильской (*Larix kurilensis*) – большим количеством различных антиоксидантов [56].

Показана противогрибковая активность экстрактов коричника камфорного (*Cinnamomum camphora*), обусловленная присутствием в экстракте камфоры и α -терпинеола [57].

Экстракты древесины псевдотсуги Мензиса (*Pseudotsuga menziesii*), кипариса нутканского (*Callitropsis nootkatensis*), можжевельника западного (*Juniperus occidentalis*), калоцедруса низбегающего (*Calocedrus decurrens*) могут уменьшить рост плесени [58], но не способны полностью защитить древесину от патогенных микромицетов. Поэтому в качестве потенциальной альтернативы традиционным системам защиты древесины можно рассматривать только многокомпонентные экстракты.

Наиболее распространённые проблемы древесных экстрактов, применяемых для противогрибковой обработки древесины – непостоянство биологической активности, вымываемость из древесины. Чтобы решить проблему вымываемости, необходима фиксация экстрактов на поверхности древесины с помощью ферментативных реакций [59].

Экстракты других растений. Экстракты камелии китайской (*Camellia sinensis*) и кофе арабийского (*Coffea arabica*) показали высокое ингибирующее действие на грибы [60]. Механизм фунгистатической активности кофеина включает его повреждающее действие на клеточную стенку и клеточную мембрану грибов [61].

Водные экстракты кофейной серебристой кожицы (отход промышленного процесса обжарки кофе) содержат хлорогеновую кислоту и производные кофеина, способные ингибировать рост и развитие патогенных грибов [62].

Несмотря на перспективность защиты древесины от патогенных грибов, кофеин легко выщелачивается из древесины, что является его основным недостатком. Стабилизировать кофеин внутри структуры древесины можно с помощью кремнийорганических соединений [63].

Низкие концентрации экстракта ядовитого растения олеандра обыкновенного (*Nerium*

oleander) обладают противогрибковой активностью [64]. Экстракты лишайника усней бородатой (*Usnea filipendula*) и омелы белой (*Viscum album*) снижали восприимчивость древесины сосны обыкновенной (*Pinus sylvestris*) к грибковому поражению [65].

Умеренные противогрибковые свойства экстракта акации ивовой (*Acacia saligna*) обусловлены присутствием бензойной кислоты, кофеина, нарингенина и кверцетина [66]. Экстракты плодов витании снотворной (*Withania somnifera*) значительно ограничивали рост мицелия патогенных грибов [67]. Противогрибковая активность этих экстрактов обусловлена действием алкалоидов, флавоноидов, гликозидов, сапонинов и дубильных веществ.

Вещества животного происхождения, защищающие древесину

Высокой эффективностью в защите древесины от биоповреждений обладают такие вещества животного происхождения, как прополис и хитозан.

Прополис в защите древесины. Прополис – продукт жизнедеятельности пчёл, вырабатываемый ими для укрепления сот, покрытия стенок ульев. Противогрибковый эффект экстракта прополиса в основном обусловлен флавоноидными и фенольными компонентами, особенно хризином, галанином, пинобанксином, коричной кислотой, кофейной кислотой и их производными [68].

Этанольный экстракт прополиса эффективен против плесневых грибов, встречающихся в древесине [69]. Доказана противогрибковая эффективность этанольного экстракта прополиса в отношении *Penicillium notatum*: подавление роста мицелия, разрушение структуры гиф и проницаемости клеточной мембраны [70]. Метанольные экстракты прополиса оказывали антифунгальное действие на грибы при обработке древесины сосны обыкновенной и павлонии [71]. Древесина тополя, обработанная раствором прополиса более устойчива к *Trametes versicolor*, чем необработанная древесина [72].

К недостаткам использования прополиса можно отнести высокую чувствительность обработки прополисом к вымыванию; снижение противогрибкового действия с течением времени, что может быть связано с биоразлагаемостью отдельных ингредиентов прополиса [72, 73].

Хитозан в защите древесины. Хитозан – полисахарид, являющийся компонентом хити-

на. Источниками получения хитина являются панцири членистоногих и биомасса микро- и макромицетов грибов.

Хитозан может использоваться для защиты древесины от действия патогенных микромицетов. Древесина тсуги канадской (*Tsuga canadensis*), обработанная хитозаном, была более устойчива к действию бурой и белой гнили, чем необработанная древесина [74]. Древесина бука городчатого (*Fagus crenata*), сосны густоцветковой (*Pinus densiflora*) и криптомерии японской (*Cryptomeria japonica*), обработанная хитозаном, более устойчива к грибам-разрушителям по сравнению с необработанной древесиной [75].

При обработке мини-блоков из сосны обыкновенной 4,8% раствором высокомолекулярного хитозана выявлена их устойчивость к действию патогенных и сапрофитных грибов [76].

Хитозан в концентрации 2% обладает фунгицидной активностью по отношению к деревоокрашивающим грибам. Хитозановое покрытие обеспечивает достаточно эффективную защиту пиломатериалов и при сроках хранения не более 10 дней не требует применения дополнительных антисептиков [77].

Установлена противогрибковая эффективность 5% раствора низкомолекулярного хитозана, используемого при обработке древесины из сосны обыкновенной и бука [78]. Показана эффективность обработки хитозаном сосны смоляной (*Pinus resinosa*) против микромицетов, выделенных с археологических образцов древесины, при этом эффективность защиты увеличивается с ростом его концентрации [79].

Хитозан может образовывать мембрану внутри структуры древесины, которая является барьером для влаги, воздуха и задерживает другие частицы, препятствуя их вымыванию из древесины [78]. Применение его в сочетании с консервантами на основе меди, цинка, серебра, хромированного арсената меди или тебуконазолом приводит к более эффективной защите древесины от плесени [63].

Применение комплексного подхода в борьбе с дереворазрушающими грибами с использованием *Trichoderma harzianum* в сочетании с хитозаном показывает высокую эффективность [80].

Таким образом, природные соединения растительного и животного происхождения представляют огромный потенциал в защите древесины, поскольку обладают широким спектром антимикробной активности. Они являются

возобновляемыми, легкодоступными или рентабельно получаемыми из отходов, нетоксичны или обладают гораздо меньшей токсичностью, чем традиционные химические биоциды, и безвредны для окружающей среды. Однако они также имеют некоторые ограничения, в том числе высокую гетерогенность в зависимости от источника, из которого они получены (например, прополис, эфирные масла, экстракты древесины), отсутствие надлежащего удерживания внутри пропитанной древесной ткани, лёгкое выщелачивание, селективную или неравномерную активность против отдельных видов грибов, высокую восприимчивость к биоразложению. Некоторые из этих недостатков можно решить, сочетая органические биоциды с другими консервантами древесины.

Заключение

Анализ литературных источников по возможности использования биометодов в защите древесины от деструктивной активности бактерий и грибов показывает, что важную роль в этом процессе могут играть такие микробы-антагонисты, как цианобактерии, бациллы и триходерма. Их способность к микростатическому или микробоцидному действию базируется на синтезе и выделении экзометаболитов, обладающих антибиотической и ферментативной активностью, которые приводят к тем или иным нарушениям в структуре или функционировании микробов-разрушителей древесины.

Природные соединения растительного (эфирные масла, дубильные вещества, экстрактивные вещества древесины) и животного происхождения (прополис, хитозан) обладают существенным потенциалом в биозащите древесины от биоповреждений, благодаря своей способности нарушать жизнедеятельность микробов-деструкторов. Большим их достоинством являются возобновляемость, рентабельность получения из отходов, нетоксичность по сравнению с минеральными биоцидами и безвредность для окружающей среды.

Безусловно, полный переход на биозащиту от биоповреждений с помощью микробиологических препаратов или препаратов животного и растительного происхождения не реален. Всегда в приоритете будут химические методы защиты, однако даже краткий обзор литературных данных показывает, что в арсенал методов защиты древесины от биоповреждений целесообразно включать и био-препараты.

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.

References

1. Kunitskaya O.A. Biotechnological way to protect wood from fungal infections // Aktualnye napravleniya nauchnykh issledovaniy XXI veka: teoriya i praktika. 2014. V. 2. No. 4–3 (9–3). P. 440–444 (in Russian). doi: 10.12737/6197
2. Leonovich O.K., Antonik A.Yu. Determination of the predominant cultures of wood-destroying and wood-staining fungi, their impact on wood // Trudy BGTU. Seriya 1: Lesnoe khozyaystvo, prirodopolzovanie i pererabotka vozobnovlyaemykh resursov. 2017. No. 2 (198). P. 299–304 (in Russian).
3. Skugoreva S.G., Trefilova L.V., Domracheva L.I., Kantor G.Ya., 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
4. Mazanik N.V. Modern bioprotective agents for wood // Trudy BGGU. No. 2. Lesnaya i derevoobrabatyvayushchaya promyshlennost. 2011. No. 2. P. 181–184 (in Russian).
5. Moldurushku M.O. The arsenic-containing production waste issue // Prirodnye resursy, sreda i obshchestvo. 2020. No. 2 (6). P. 76–78 (in Russian). doi: 10.24411/2658-4441-2020-10019
6. Naga Pavan Kumar B., Mahaboobi S., Satyam S. Cyanobacteria: a potential natural source for drug discovery and bioremediation // Jr. of Industrial Pollution Control. 2016. V. 32. No. 2. P. 508–517.
7. Thummajitsakul S., Silprasit K., Sittipraneed S. Antibacterial activity of crude extracts of cyanobacteria *Phormidium* and *Microcoleus* species // Biology African Journal of Microbiology Research. 2012. V. 16. No. 10. P. 2574–2579. doi: 10.5897/AJMR12.152
8. Singh J., Mishra S.K., Dwivedi N. Antibacterial activity of *Fischerella muscicola* NDUPC001 // IOSR Journal of Biotechnology and Biochemistry. 2017. V. 3. No. 4. P. 87–90. doi: 10.18520/cs/v116/i7/1229-1233
9. Chakdar H., Jadhav S.D., Dhar D.W., Pabbi S. Potential applications of blue green algae // Journal of Scientific & Industrial Research. 2012. V. 71. P. 13–20.
10. Osman R.K., Goda H., Higazy A.M. Evaluation of some extra- and intracellular cyanobacterial extracts as antimicrobial agents // International Journal of Advanced Research. 2015. V. 3. No. 5. P. 852–864.
11. Kumar B.N.P., Manaboobi S., Satyam S. Cyanobacteria: a potential natural source for drug discovery and

- bioremediation // Jr. of Industrial Pollution Control. 2016. V. 32. No. 2. P. 508–517.
12. Domracheva L.I., Fokina A.I., Kovina A.L., Ashikhmina T.Ya. Exometabolites of soil cyanobacteria as a survival strategy in natural and technogenically disturbed ecosystems // Theoretical and Applied Ecology. 2019. No. 4. P. 15–23 (in Russian). doi: 10.25750/1995-4301-2019-4-015-023
13. Kajiyama S., Kanzaki H., Kawazu K., Kobayashi A. *Nostoc* fungicide, an antifungal lipopeptide from the field grown terres trial blue-green alga *Nostoc commune* // Tetrahedron Lett. 1998. V. 39. No. 22. P. 3737–3740.
14. Prasanna R., Nain L., Tripathi R., Gupta V., Chaudhary V., Middha S., Joshi M., Ancha R., Kaushic B.D. Evaluation of fungicidal activity of extracellular filtrates of cyanobacteria – possible role of hydrolytic enzymes // J. Basic Microbiol. 2008. V. 48. No. 3. P. 186–194.
15. Pawar S.T., Puranik P.R. Screening of terrestrial and freshwater halotolerant cyanobacteria for antifungal activities // World J. Microbiol. and Biotechnol. 2008. V. 24. No. 7. P. 1019–1025.
16. Falch B.S., König G.M., Wright A.D., Sticher O. Ambigol A and B: New biological active polychlorinated aromatic compounds from the terrestrial blue-green alga *Fischerella ambigua* // J. Org. Chem. 1993. V. 58. P. 6570–6575. doi: 10.1002/chin.199412284
17. Smitka T.A., Bonjouklian R., Doolin L., Jones N.D., Deeter J.B., Yoshida W.Y., Prinsep M.R., Patterson G.M.L. Ambiguine isonitriles, fungicidal hapalindole-type alkaloids from three genera of blue-green algae belonging to Stigonemataceae // J. Org. Chem. 1992. V. 57. No. 3. P. 857–861. doi: 10.1021/jo00029a014
18. Papke U., Gross E.M., Francke W. Isolation, identification and determination of the absolute configuration of fischerellin B. A new algicide from the freshwater cyanobacterium *Fischerella ambigua* (Thuret.) // Tetrahedron Lett. 1997. V. 38. No. 3. P. 379–382. doi: 10.1016/S0040-4039(96)02284-8
19. Bataeva Yu.V., Kurashov E.A., Krylova Yu.V. Chromato-mass-spectrometric study of exogenous metabolites of algal-bacterial communities in enrichment culture // Voda: khimiya i ekologiya. 2014. No. 9 (75). P. 59–68 (in Russian).
20. Tiberkevich N.Ya., Sakevich A.I. Companion bacteria in cultures of cyanoprokaryotes and green algae // Hidrobiologicheskii zhurnal. 2001. V. 37. No. 1. P. 54–63 (in Russian).
21. Maksimov I.V., Singh B.P., Cherepanova E.A., Burkhanova G.F., Khairullin R.M. Prospects for the use of bacteria – producers of lipopeptides for plant protection (review) // Applied Biochemistry and Microbiology. 2020. V. 56. No. 1. P. 15–284. doi: 10.1134/S0003683820010135
22. Fira D., Dimkić I., Berić T., Lozo J., Stanković S. Biological control of plant pathogens by *Bacillus* species // J. Biotechnology. 2018. V. 285. No. 1. P. 44–55. doi: 10.1016/j.jbiotec.2018.07.044
23. Fiedler S., Heerklotz H. vesicle leakage reflects the target selectivity of antimicrobial lipopeptides from *Bacillus subtilis* // Biophys. J. 2015. V. 109. No. 10. P. 2079–2089. doi: 10.1016/j.bpj.2015.09.021
24. Sidorova T.M., Asaturova A.M., Allahverdyan V.V. Features of antagonism of bacteria of the genus *Bacillus* in relation to toxicogenic fungi *Fusarium* in the protection of plants from disease and contamination with mycotoxins (review) // South of Russia: ecology, development. 2021. V. 16. No. 4. P. 86–103 (in Russian). doi: 10.18470/1992-1098-2021-4-86-103
25. Kang X., Zhang W., Cai X., Tong Z., Xue Y., Liu C. *Bacillus velezensis* CCO9: a potential “vaccine” for controlling wheat diseases // Published online. 2018. V. 31. No. 6. P. 623–632. doi: 10.1094/MPMI-09-17-0227-R
26. Melentiev A.I., Helisto P., Kuzmina L.Yu., Galimzyanova N.F., Aktuganov G.E., Korpela T. Application of antagonist bacilli for biocontrol of fungi that destroy raw wood // Prikladnaya biokhimiya i mikrobiologiya. 2006. V. 42. No. 1. P. 70–75 (in Russian).
27. Sidorova T.M., Asaturova A.M., Khomyak A.I. Biologically active metabolites of *Bacillus subtilis* and their role in the control of phytopathogenic microorganisms (review) // Agricultural Biology. 2018. V. 53. No. 1. P. 29–37. doi: 10.15389/agrobiology.2018.1.29eng
28. Stein T. *Bacillus subtilis* antibiotics: structures, syntheses and specific functions. Micro Review // Mol. Microbiol. 2005. V. 56. No. 4. P. 845–857. doi: 10.1111/j.1365-2958.2005.04587.x
29. Wang T., Liang Y., Wu M., Chen Z., Lin J., Yang L. Natural products from *Bacillus subtilis* with antimicrobial properties // Chinese J. Chem. Eng. 2015. V. 23. No. 4. P. 744–754. doi: 10.1016/j.cjche.2014.05.020
30. Sharma A. Rhamnolipid producing PGPR and their role in damping off disease suppression // Plant bacteria interactions strategies and techniques to promote plant growth / Eds. I. Ahmad, J. Pichtel, S. Haya. Wiley VCH Publications, Weinheim, 2008. P. 213–233. doi: 10.1002/9783527621989.ch11
31. Li J., Yang Q., Zhao L., Zhang S., Wang Y., Zhao X. Purification and characterization of a novel antifungal protein from *Bacillus subtilis* strain B29 // J. Zhejiang Univ. Sc. B. 2009. V. 10. No. 4. P. 264–272. doi: 10.1631/jzus.B0820341
32. López D., Vlamakis H., Losick R., Kolter R. Cannibalism enhances biofilm development in *Bacillus subtilis* // Mol. Microbiol. 2009. V. 74. P. 609–618. doi: 10.1111/j.1365-2958.2009.06882.x
33. 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 zashchity rasteniy. 2006. No. 3. P. 13–21 (in Russian).
34. Novikova I.I., Shenin Yu.D., Tsyplenkov A.E., Fominykh T.S., Suika P.V., Boikova I.V. Biological features of peptides and heptaene aromatic macrolides isolated

from *Streptomyces chrysomallus* P-21 and *S. globisporus* L-242 – strains-producers of polyfunctional biologics chrysoal and globerin for protecting plants from diseases of various etiologies // Vestnik zashchity rasteniy. 2009. No. 2. P. 3–19 (in Russian).

35. Novikova I.L., Titova Yu.A., Boikova I.V., Krasnobaeva I.L. Directed selection of the psychrophilic strain *Trichoderma asperellum* G-034 VIZR for accelerated utilization of plant residue polymers and soil improvement // Vavilov Journal of Genetics and Breeding. 2019. V. 23. No. 3. P. 328–336 (in Russian). doi: 10.18699/VJ19.497

36. Shcherbakova T. Spectrum of antifungal action of a biological product based on *Trichoderma virens* Miller, Giddens and Foster on pathogens of agricultural crops // Știința agricolă. 2019. No. 1. P. 84–88 (in Russian).

37. Domracheva L.I., Skugoreva S.G., Starikov P.A., Gornostaeva E.A., Ashikhmina T.Ya. Microbes-antagonists against of phytopathogenic bacteria and fungi (review) // Theoretical and Applied Ecology. 2022. No. 2. P. 6–14 (in Russian). doi: 10.25750/1995-4301-2022-2-006-014

38. Susi P., Aktuganov G., Himanen J., Korpela T. Biological control of wood decay against fungal infection // Journal of Environmental Management. 2011. V. 92. No. 7. P. 1681–1689. doi: 10.1016/j.jenvman.2011.03.004

39. Ogarkov B.N., Ogarkova G.R., Samusenok L.V., Bukovskaya N.E. Development of mycofungicide for protection against biodamage of industrial materials, products and wood // Modern problems of biology, ecology and soil science. Moskva: Izd-vo IGU, 2019. P. 74–76 (in Russian).

40. Humphris S.N., Wheatley R.E., Bruce A. The effects of specific volatile organic compounds produced by *Trichoderma* spp. on the growth of wood decay basidiomycetes // Wood Science and Technology Holzforschung. 2001. V. 55. No. 3. P. 233–237. doi: 10.1515/HF.2001.038

41. Wheatley R., Hackett C., Bruce A., Kundzewicz A. Effect of substrate composition on production of volatile organic compounds from *Trichoderma* spp. inhibitory to wood decay fungi // International Biodeterioration & Biodegradation. 1997. V. 39. No. 2–3. P. 199–205. doi: 10.1016/S0964-8305(97)00015-2

42. Voda K., Boh B., Vrtačnik M., Pohleven F. Effect of the antifungal activity of oxygenated aromatic essential oil compounds on the white-rot *Trametes versicolor* and the brown-rot *Coniophora puteana* // Int. Biodeter. Biodegr. 2003. V. 51. No. 1. P. 51–59. doi: 10.1016/S0964-8305(02)00075-6

43. Chittenden C., Singh T. Antifungal activity of essential oils against wood degrading fungi and their applications as wood preservatives // Int. Wood Prod. J. 2011. V. 2. No. 1. P. 44–48. doi: 10.1179/2042645311Y.0000000004

44. Xie Y., Wang Z., Huang Q., Zhang D. Antifungal activity of several essential oils and major components against wood-rot fungi // Ind. Crops Prod. 2017. V. 108. No. 1. P. 278–285. doi: 10.1016/j.indcrop.2017.06.041

45. Salem M.Z.M., Zidan Y.E., Mansour M.M.A., El Hadidi N.M.N., Elgat W.A.A. Antifungal activities of two

essential oils used in the treatment of three commercial woods deteriorated by five common mold fungi // Int. Biodeter. Biodegr. 2016. V. 106. P. 88–96. doi: 10.1016/j.ibiod.2015.10.010

46. Rawat K., Sahoo U.K., Hegde N., Kumar A. Effectiveness of neem (*Azadirachta indica* A. Juss) oil against decay fungi // Sci. Technol. J. 2018. V. 5. No. 1. P. 48–51. doi: 10.22232/stj.2017.05.01.06

47. Broda M. Natural compounds for wood protection against fungi – a review // Molecules. 2020. V. 25. No. 15. Article No. 3538. doi: 10.3390/molecules25153538

48. Anttila A.-K., Pirttilä A.M., Häggman H., Harju A., Venäläinen M., Haapala A., Holmbom B., Julkunen-Tiitto R. Condensed conifer tannins as antifungal agents in liquid culture // Holzforschung. 2013. V. 67. No. 7. P. 825–832. doi: 10.1515/hf-2012-0154

49. Özgenç Ö., Durmaz S., Yıldız Ü.C., Erişir E. A comparison between some wood bark extracts: antifungal activity // Kastamonu Üniv. Orman Fakültesi Dergisi. 2017. V. 17. No. 3. P. 502–508. doi: 10.17475/kastorman.282637

50. Sen S., Tascioglu C., Tirak K. Fixation, leachability, and decay resistance of wood treated with some commercial extracts and wood preservative salts // Int. Biodeter. Biodegr. 2009. V. 63. No. 2. P. 135–141. doi: 10.1016/j.ibiod.2008.07.007

51. Yamaguchi H., Okuda K. Chemically modified tannin and tannin-copper complexes as wood preservatives // Holzforsch. Int. J. Biol. Chem. Phys. Technol. Wood. 1998. V. 52. P. 596–602. doi: 10.1515/hfsg.1998.52.6.596

52. Singh T., Singh A.P. A review on natural products as wood protectant // Wood Sci. Technol. 2012. V. 46. No. 5. P. 851–870. doi: 10.1007/s00226-011-0448-5

53. Sablik P., Giagli K., Pařil P., Baar J., Rademacher P. Impact of extractive chemical compounds from durable wood species on fungal decay after impregnation of non-durable wood species // Eur. J. Wood Wood Prod. 2016. V. 74. No. 2. P. 231–236. doi: 10.1007/s00107-015-0984-z

54. Brocco V.F., Paes J.B., Costa L.G., Brazolin S., Arantes M.D.C. Potential of teak heartwood extracts as a natural wood preservative // J. Clean. Prod. 2017. V. 142. No. 4. P. 2093–2099. doi: 10.1016/j.jclepro.2016.11.074

55. Anda R.R., Koch G., Richter H.-G., Talavera F.J.F., Guzmán J.A.S., Satyanarayana K.G. Formation of heartwood, chemical composition of extractives and natural durability of plantation-grown teak wood from Mexico // Holzforschung. 2019. V. 73. No. 6. P. 547–557. doi: 10.1515/hf-2018-0109

56. Füchtner S., Brock-Nannestad T., Smeds A., Fredriksson M., Pilgård A., Thygesen L.G. Hydrophobic and hydrophilic extractives in norway spruce and kurile larch and their role in brown-rot degradation // Front. Plant Sci. 2020. V. 11. Article No. 855. doi: 10.3389/fpls.2020.00855

57. Li Q., Wang X.-X., Lin J.-G., Liu J., Jiang M.-S., Chu L.-X. Chemical composition and antifungal activity of extracts from the xylem of *Cinnamomum camphora* // BioResources. 2014. V. 9. No. 2. P. 2560–2571.

58. Maoz M., Karchesy J.J., Morrell J.J. Ability of natural extracts to limit mold growth on Douglas-fir sapwood // *BioResources*. 2012. V. 7. No. 4. P. 5415–5421. doi: 10.15376/biores.7.4.5415-5421
59. Fernández-Costas C., Palanti S., Charpentier J.-P., Sanromán M.Á., Moldes D. A sustainable treatment for wood preservation: Enzymatic grafting of wood extractives // *ACS Sustain. Chem. Eng.* 2017. V. 5. No. 9. P. 7557–7567. doi: 10.1021/acssuschemeng.7b00714
60. Arora D.S., Ohlan D. *In vitro* studies on antifungal activity of tea (*Camellia sinensis*) and coffee (*Coffea arabica*) against wood-rotting fungi // *J. Basic Microbiol.* 1997. V. 37. No. 3. P. 159–165. doi: 10.1002/jobm.3620370302
61. Wang Y.-C., Qian W.-J., Li N.-N., Hao X.-Y., Wang L., Xiao B., Wang X.-C., Yang Y.-J. Metabolic changes of caffeine in tea plant (*Camellia sinensis* (L.) O. Kuntze) as defense response to *Colletotrichum fructicola* // *J. Agric. Food Chem.* 2016. V. 64. No. 35. P. 6685–6693. doi: 10.1021/acs.jafc.6b02044
62. Barbero-López A., Monzó-Beltrán J., Virjamo V., Akkanen J., Haapala A. Revalorization of coffee silverskin as a potential feedstock for antifungal chemicals in wood preservation // *Int. Biodeter. Biodegr.* 2020. V. 152. Article No. 105011. doi: 10.1016/j.ibiod.2020.105011
63. Broda M., Mazela B., Frankowski M. Durability of wood treated with aatmos and caffeine-towards the long-term carbon storage // *Maderas-Cienc. Tecnol.* 2018. V. 20. No. 3. P. 455–468. doi: 10.4067/S0718-221X2018005031501
64. Goktas O., Mammadov R., Duru M.E., Ozen E., Colak A.M. Application of extracts from the poisonous plant, *Nerium oleander* L., as a wood preservative // *Afr. J. Biotechnol.* 2007. V. 6. No. 17. P. 2000–2003.
65. Yildiz Ü.C., Kiliç C., Gürgen A., Yildiz S. Possibility of using lichen and mistletoe extracts as potential natural wood preservative // *Maderas-Cienc. Tecnol.* 2020. V. 22. No. 2. P. 179–188. doi: 10.4067/S0718-221X2020005000204
66. Al-Huqail A.A., Behiry S.I., Salem M.Z.M., Ali H.M., Siddiqui M.H., Salem A.Z. Antifungal, antibacterial, and antioxidant activities of *Acacia saligna* (Labill.) HL Wendl. flower extract: HPLC analysis of phenolic and flavonoid compounds // *Molecules*. 2019. V. 24. No. 4. Article No. 700. doi: 10.3390/molecules24040700
67. EL-Hefny M., Salem M.Z.M., Behiry S.I., Ali H.M. The potential antibacterial and antifungal activities of wood treated with *Withania somnifera* fruit extract, and the phenolic, caffeine, and flavonoid composition of the extract according to HPLC // *Processes*. 2020. V. 8. No. 1. Article No. 113. doi: 10.3390/pr8010113
68. Bankova V.S., de Castro S.L., Marcucci M.C. Propolis: Recent advances in chemistry and plant origin // *Apidologie*. 2000. V. 31. No. 1. P. 3–15. doi: 10.1051/apido:2000102
69. Quiroga E.N., Sampietro D.A., Soberón J.R., Sgariglia M.A., Vattuone M.A. Propolis from the northwest of Argentina as a source of antifungal principles // *J. Appl. Microbiol.* 2006. V. 101. No. 1. P. 103–110. doi: 10.1111/j.1365-2672.2006.02904.x
70. Xu X., Pu R., Li Y., Wu Z., Li C., Miao X., Yang W. Chemical compositions of propolis from China and the united states and their antimicrobial activities against *Penicillium notatum* // *Molecules*. 2019. V. 24. No. 19. Article No. 3576. doi: 10.3390/molecules24193576
71. Akçay Ç., Birinci E., Birinci C., Kolaylı S. Durability of wood treated with propolis // *BioResources*. 2020. V. 15. No. 1. P. 1547–1562.
72. Casado-Sanz M.M., Silva-Castro I., Ponce-Herrero L., Martín-Ramos P., Martín-Gil J., Acuña-Rello L. White-rot fungi control on *Populus* spp. Wood by pressure treatments with silver nanoparticles, chitosan oligomers and propolis // *Forests*. 2019. V. 10. No. 10. Article No. 885. doi: 10.3390/f10100885
73. Jones D., Howard N., Suttie E. The potential of propolis and other naturally occurring products for preventing biological decay // *Proceedings of the 42nd Annual Meeting of the International Research Group on Wood Protection, Queenstown, New Zealand, 8–12 May 2011. IRG Secretariat: Stockholm, Sweden, 2011. Article No. IRG-WP 11-30575.*
74. Kobayashi T., Furukawa I. Wood-preserving effectiveness of chitosan-metal salts against wood decaying fungi // *J. Anti Bact. Antifung. Agents*. 1995. V. 23. P. 343–348.
75. Furukawa I., Yamamoto S. Improvement of wood quality with chitin and chitosan. (II). Assessment of the fungicidal effect of chitosan-treated wood on wood decaying fungi and microorganisms in the soil // *Res. Bull. Tottori Univ. For.* 1990. No. 19. P. 49–58.
76. Eikenes M., Alfredsen G., Christensen B.E., Militz H., Solheim H. Comparison of chitosans with different molecular weights as possible wood preservatives // *J. Wood Sci.* 2005. V. 51. P. 387–394. doi: 10.1007/s10086-004-0659-6
77. Mazanik N.V. Experience in the use of chitosan to protect wood from fungal damage // *Trudy BGTU. Seriya 1: Lesnoe khozyaystvo, prirodopolzovanie i pererabotka vozobnovlyaemykh resursov*. 2019. No. 1 (216). P. 158–162 (in Russian).
78. Larnøy E., Dantz S., Eikenes M., Militz H. Screening of properties of modified chitosan-treated wood // *Wood Mater. Sci. Eng.* 2006. V. 2. P. 59–68. doi: 10.1080/17480270600861118
79. El-Gamal R., Nikolaivits E., Zervakis G.I., Abdel-Maksoud G., Topakas E., Christakopoulos P. The use of chitosan in protecting wooden artifacts from damage by mold fungi // *Electron. J. Biotechnol.* 2016. V. 24. P. 70–78. doi: 10.1016/j.ejbt.2016.10.006
80. Chittenden C., Singh T. *In vitro* evaluation of combination of *Trichoderma harzianum* and chitosan for the control of sapstain fungi // *Biological Control*. 2009. V. 50. No. 3. P. 262–266. doi: 10.1016/j.biocontrol.2009.04.015

Sample size and power calculations for nonparametric tests in vegetation research

© 2023. M. Mousaei Sanjerehei ^{ORCID: 0000-0002-9772-6021}
Department of Plant Protection, Yazd Branch,
Islamic Azad University, Yazd, Iran,
e-mail: mmusaei@iauyazd.ac.ir

An adequate sample size and a reliable statistical power is required for accurately estimating vegetation characteristics and proper interpretation of research results. The sample size depends on the significance level, power of test and effect size. An appropriate equation for determination of sample size and power must be selected in accordance with the measurement scale, distribution of data, type of research and statistical analysis test. In this paper, equations were explained for calculating sample size and power for the most frequently used nonparametric tests in vegetation studies including the sign test, Wilcoxon signed rank, Mann-Whitney U, Kruskal-Wallis, Spearman rank correlation, Chi-square and McNemar tests. Each equation is presented with an example of its use in vegetation research.

Keywords: effect size, nonparametric tests, sample size, power, significance level, vegetation.

УДК 519.254

Размер выборки и расчёт мощности для непараметрических тестов в исследованиях растительности

© 2023. М. Мусай Санжерехей, PhD, доцент,
Филиал Исламского университета Азад в Йезде,
Иран, Йезд, Сафайе, бульвар Хесаби,
e-mail: mmusaei@iauyazd.ac.ir

Для точной оценки характеристик растительности и надлежащей интерпретации результатов исследований требуется адекватный размер выборки и надёжная статистическая мощность. Размер выборки зависит от уровня значимости, статистической мощности теста и размера эффекта. Соответствующее уравнение для определения размера выборки и мощности должно быть выбрано в соответствии с масштабом измерения, распределением данных, типом исследования и методом статистического анализа. В данной статье даны пояснения к уравнениям для расчёта размера выборки и мощности для наиболее часто используемых непараметрических тестов в исследованиях растительности, включая критерий знака, знаковый ранг Уилкоксона, критерий Манна-Уитни, критерий Крускала-Уоллиса, ранговую корреляцию Спирмена, критерий хи-квадрат и критерий Макнемара. Каждое уравнение представлено с примером его использования в исследованиях растительности.

Ключевые слова: размер эффекта, непараметрические тесты, объём выборки, статистическая мощность, уровень значимости, растительность.

Parametric tests make certain conditions about the parameters of population. The most important assumptions of parametric tests are 1) the data must be independent, 2) the data must be normally distributed, 3) the populations must have the same variance, 4) the measurement must be in an interval or ratio scale and 5) there must be a linear relationship between the data. In general, parametric tests are more powerful than nonparametric tests because these

tests have strongest assumptions about the population. Nonparametric tests do not make any certain assumption about the population and can be used when the distribution of data is not known. If sample size is as small as 6, there is no alternative to using a nonparametric test unless the population distribution is exactly known [1]. Nonparametric tests can be used for analyzing the four scales of measurement; nominal (e. g., presence/absence of plants in plots, percentage

number of plant species in different life form categories such as therophytes and cryptophytes), ordinal (e. g., rangeland condition scores, intensity of grazing, cover and biomass classes), interval (e. g., temperature, time of grazing) and ratio (e. g., most of vegetation characteristics such as biomass, density, richness, cover, height, seed size) scales. However these tests are mostly used for nominal and ordinal scales. Interval and ratio data can be analyzed by nonparametric tests if they are ordered and ranked. If data are in ranks or can be categorized into ordinal scales (e. g., more or less, better or worse), they can be analyzed by nonparametric tests whereas they cannot be analyzed by parametric tests unless precarious and unrealistic assumptions are made about the underlying distributions [1].

Two of the most important stages of vegetation studies are calculation of adequate sample size and statistical power. In vegetation studies, sample size is the required number of sampling units (e. g., plots, quadrats, points, transects, seed and fruit traps), plant individuals, plant parts (e. g., seed, stem, leaf) taken for estimating and comparing vegetation characteristics such as cover, biomass, density, production, richness, height, diameter, nutrients, rooting depth, interactions, etc.

An accurate sample size is required for reliable estimate of vegetation attributes. The required sample size depends on the significance level, power level and effect size. Significance level (α) or Type I error is defined as the probability of rejecting the null hypothesis, when it is true. The most common significance levels used in vegetation studies are 10%, 5% and 1% [2, 3]. A decrease in the significance level leads to an increase in the sample size.

Effect size is the size of difference between the groups being compared. The term “effect size” was defined as the degree to which the phenomenon is present in the population [4]. Examples of effect size are the odds ratio in a contingency table, the difference in the proportion between positive and negative ranks for Wilcoxon signed rank test, the difference between the proportion of positive or negative ranks and zero for sign test and the difference of correlation from zero in Spearman rank correlation. The larger the effect size, the smaller the sample size.

The power of a statistical test is the probability that it will yield statistically significant results. Statistical Power is defined as the probability of correctly rejecting the null hypothesis when it is false, and it is equal to $1-\beta$. Type II error (β) is the probability of accepting the null hypothesis

when it is false. The power of a test depends upon three parameters; sample size, significance level and effect size. The larger the sample size, other things (significance level, effect size) being equal, the larger the power. Also, the lower the value of significance level, the lower the power of the test. Sample size and power should be calculated before data collection using data of previous studies. When the power is calculated after data collection, it can be used to verify whether a non-significant result is due to lack of strong relationship between the groups or due to a low statistical power. An ideal study is the one with a high power indicating that the study has a high chance of detecting a difference between groups if it exists [5]. Common values used for calculating power in vegetation studies are 0.8 and 0.9 [6–8].

The objective of this study was to present sample size and power equations and explain with examples how to use these equations for nonparametric tests according to the type of vegetation research, measurement scale of data and the statistical analysis test. The sample size and power formulas presented in this study were explained for the most frequently used nonparametric tests in vegetation studies including the Wilcoxon signed rank, sign test, Mann-Whitney U, Kruskal-Wallis, Spearman rank correlation, Chi-square and McNemar tests.

Methods

Wilcoxon signed rank test is used for testing both paired samples and one sample case. This statistic is used to test the differences or changes in a vegetation characteristic (e. g., richness, density, cover, biomass, production, height, rooting depth, leaf size, seed weight, nutrient contents, number of flowers), vegetation index (e. g., Shannon diversity index, leaf area index), spectral vegetation index (e. g., normalized difference vegetation index, NDVI, modified soil adjusted vegetation index, MSAVI), number of animals, and area of a vegetation type (e. g., woodland) between two time periods or before and after a management (e. g., grazing, manuring, vegetation removal) or disturbance (e. g., fire, climate change). It can also be used for testing the differences in estimates of a vegetation characteristic (e. g., cover, biomass, density) between two methods (e. g., plot and line transect method), or the differences in a soil property (e. g., EC, water content, nutrients) or a climate variable (e. g., precipitation, temperature) in a habitat between two time periods or before and after management, treatment or disturbance [9,

10]. Wilcoxon signed rank test is more efficient than sign test because it uses more of the information in the data, and is affected by the relative magnitude of the differences. In the Wilcoxon signed rank test, the difference and the absolute value of difference is computed for each pair of observations. All non-zero absolute differences are sorted into ascending order, and ranks are assigned. In case of ties (two or more ranks are equal), the average rank is computed.

Sample size calculation for Wilcoxon signed rank test. The Sample size for the Wilcoxon signed rank test is calculated as follows [11]:

$$N = (Z_{\alpha/2} + Z_{\beta})^2 / 3(p' - 0.5)^2,$$

where $p' = (S_p - Np) / 0.5N(N - 1)$
and $p = n_p / (n_p + n_n)$.

$N = n_p + n_n$ is number of non-zero differences, n_p and n_n are respectively number of positive and negative differences, S_p is the sum of the ranks corresponding to positive differences, p and p' can be obtained from a preliminary sample or from previous studies, $Z_{\alpha/2}$ is standard normal variate for significance level ($Z_{\alpha/2} = 1.96$ at $\alpha = 5\%$ and $Z_{\alpha/2} = 2.576$ at $\alpha = 1\%$ for a two tailed hypothesis). For a one-tailed test $Z_{\alpha/2}$ is replaced by Z_{α} ($Z_{\alpha} = 1.645$ at $\alpha = 5\%$ and $Z_{\alpha} = 2.326$ at $\alpha = 1\%$), Z_{β} is standard normal variate for power of study. $Z_{\beta} = 0.842$ for 80% power, and $Z_{\beta} = 1.282$ for 90% power. The effect size is the rank-biserial correlation (the difference between the proportion of positive and negative ranks).

Example. In a study, number of plants in a habitat was counted in 8 fixed plots (Table 1) between two time periods (dry year and wet year) to test if the differences in the number of plants between the two time periods are significant.

$$S_p = 8 + 4 + 5 + 7 + 6 + 2 = 32, p = 6/8 = 0.75,$$

$$p' = 32 - (8 \cdot 0.75) / 0.5 \cdot 8 \cdot (8 - 1) = 0.928.$$

Suppose a researcher wishes to test the differences in number of plants in a habitat between two time periods assuming that p' may be around 0.9 according to the previous study. Then, the required sample size at 5% significance level and 80% power based on a two-sided test is: $N = (1.96 + 0.842)^2 / 3(0.9 - 0.5)^2 = 16.35$.

The required sample size is 17 after rounding up.

Power calculation for Wilcoxon signed rank test. The power for the Wilcoxon signed rank test is calculated as follows: $Z_{\beta} = \sqrt{3(p' - 0.5)^2 \cdot N} - Z_{\alpha/2}$. The power for the value of Z_{β} is obtained from the table of standard normal probabilities. Z_{α} is used instead of $Z_{\alpha/2}$ for a one-tailed test.

Example. A researcher plans to test the differences in number of plants in a habitat between two time periods using 10 fixed plots assuming that p' is near 0.9. The power for the Wilcoxon signed rank test at 5% significance level for a two-tailed test is calculated as follows: $Z_{\beta} = \sqrt{(3)(0.9 - 0.5)^2 \cdot 10} - 1.96 = 0.23$. The power for the value of $Z_{\beta} = 0.23$ is 0.591 from z-table.

Sign test is applied for testing both paired samples and one sample case. The applications of sign test are similar to the applications of Wilcoxon signed rank test in vegetation studies as explained before [12]. In sign test, the difference for each pair is calculated, and the number of positive differences (n_p) and negative differences (n_n) is counted. The cases in which the difference equals zero are ignored.

Sample size calculation for sign test. The sample size for the sign test is calculated as follows [11]:

$$N = \frac{(Z_{\alpha/2} + Z_{\beta})^2}{4(p - 0.5)^2},$$

where $p = n_p / (n_p + n_n)$ or $p = n_n / (n_p + n_n)$ and n_p is the number of positive differences and n_n is the number of negative differences, p can be calculated from a preliminary sample or taken from previous studies. The effect size for sign test is defined as $p - 0.5$.

Example. Suppose the objective is to test whether the differences in biomass of plants in a habitat between two time periods are significant using sign test. The biomass of plants is assumed to increase in 75% and decrease in 25% of the fixed plots between the two time periods. Then the sample size for testing the differences in biomass at 5% significance level and 80% power is: $N = (1.96 + 0.842)^2 / 4(0.75 - 0.5)^2 = 31.4$. Then 32 fixed plots are required based on two-tailed test.

Power calculation for sign test. The power for sign test is calculated as follows: $Z_{\beta} = \sqrt{4(p - 0.5)^2 \cdot N} - Z_{\alpha/2}$. The power for the value of Z_{β} is obtained from the table of standard normal probabilities. Z_{α} is used instead of $Z_{\alpha/2}$ for a one-tailed test.

Table 1

Number of plants in eight fixed plots in dry and wet year								
Number of plants in dry year	12	10	14	11	9	10	8	13
Number of plants in wet year	28	16	12	6	18	25	21	16
Difference	+16	+6	-2	-5	+9	+15	+13	+3
Rank	8	4	1	3	5	7	6	2

Example. Suppose a researcher wishes to use 36 fixed plots for testing the differences in biomass of plants in a habitat between two time periods expecting that the biomass will increase in 75% of the plots and decrease in 25% of the plots. Then, what is the power of the sign test at 5% significance level for a two-sided hypothesis?

$Z_\beta = \sqrt{(4)(0.75-0.5)^2 \cdot 36 - 1.96} = 1.04$. The power for the value of $Z_\beta = 1.04$ is 0.85 from z-table.

Mann-Whitney U test is used to test whether the difference between two independent samples is significant. This statistical method is used to test the differences in a vegetation characteristic (e. g., richness, cover, biomass, density, height, basal area, production, nutrients, seed weight), spectral vegetation index (e. g., NDVI) or vegetation index (e. g., Simpson diversity index, Pielou's index of non-randomness) between two sites (e. g., two habitats, two vegetation types, grazed and ungrazed sites, manured and unmanured sites). This test can also be used for testing the differences in a soil or climate variable between two habitats, or the differences in a vegetation characteristic between two plant species or two life form categories [13]. To calculate Mann-Whitney U test, the observations for both groups are combined, sorted in order of increasing size and ranked. If ties exist (two or more ranks are equal), the average rank is calculated.

Sample size calculation for Mann-Whitney U test. The sample size for Mann-Whitney U test can be calculated as follows [11]: $N = (Z_{\alpha/2} + Z_\beta)^2 / 12c(1-c)(p'' - 0.5)^2$ where $c = n_1 / N$ or $c = n_2 / N$ and $p'' = U / n_1 n_2$ and $U = n_1 n_2 + [n_1(n_1 + 1) / 2] - S_1$, S_1 is the sum of ranks for group 1, n_1 and n_2 are the sample size of group 1 and 2 respectively, $N = n_1 + n_2$, p'' can be obtained from a preliminary sample or from previous studies. The effect size is the rank-biserial correlation $(1 - 2U / n_1 n_2)$.

Example. A study was conducted to test whether there is a significant difference in the normalized difference vegetation index (NDVI) between two vegetation types. The mean NDVI in 12 plots (5 plots in vegetation type 1 and 7 plots in vegetation type 2) is presented in the following table (Table 2).

Suppose a researcher wishes to test whether there are significant differences in the NDVI between two vegetation types. The researcher can estimate that p'' will be about 0.06 (or 0.94) according to the previous study, and plans to use 40% of the plots in one vegetation type and 60% of the plots in the other vegetation type. Then, the required sample size at 5% significance level and 90% power is: $N = (1.96 + 1.282)^2 / (12 \cdot 0.40)(1 - 0.40)(0.06 - 0.5)^2 = 18.85$. Then, 19 plots need to be used for both groups (11 plots in one vegetation type and 8 plots in the other) for a two-sided test.

Power calculation for Mann-Whitney U test. The power for Mann-Whitney U test to detect the difference between two independent samples is calculated as follows: $Z_\beta = \sqrt{12c(1-c)(p'' - 0.5)^2 \cdot N - Z_{\alpha/2}}$. The power is calculated using the value of Z_β from the table of standard normal probabilities. $Z_{\alpha/2}$ is replaced by Z_α for a one-tailed test.

Example. According to the previous example, if the researcher wishes to use 5 plots in one vegetation type and 7 plots in the other, and expecting that $p'' = 0.06$ (or 0.94), the power for testing the differences in NDVI values between the two vegetation types at 5% significance level is calculated as follows: $N = 5 + 7 = 12$, $c = 5 / 12 = 0.417$.

$$Z_\beta = \sqrt{12 \cdot 0.417 \cdot (1 - 0.417)(0.06 - 0.5)^2 \cdot 12 - 1.96} = 0.64$$

The power for the value of $Z_\beta = 0.64$ from z-table for a two-sided test is 0.739.

Spearman rank correlation. In vegetation studies, Spearman rank correlation is used to detect the relation between a vegetation characteristic (e. g., biomass, production, density, richness, height, abundance, basal area, leaf size, seed weight, leaf area index) and an environmental variable (e. g., precipitation, temperature, humidity, elevation, slope, soil pH, EC, water content, nutrients). It can also be used for calculating the association in a plant characteristic (e. g., biomass) between two plant species [14, 15].

Sample size calculation for Spearman rank correlation. The sample size for Spearman rank correlation (r_s) is calculated as follows [16]:

Mean NDVI in 5 plots in vegetation type 1 and 7 plots in vegetation type 2

Table 2

	Vegetation type 1					Vegetation type 2						
Mean NDVI	0.58	0.60	0.65	0.67	0.50	0.35	0.48	0.59	0.32	0.38	0.40	0.42
Rank	8	10	11	12	7	2	6	9	1	3	4	5

$$S_1 = 8 + 10 + 11 + 12 + 7 = 48, \quad U = (5 \cdot 7) + [5(5+1)/2] - 48 = 2$$

$$c = 5/12 = 0.417, \quad p'' = 2/(5 \cdot 7) = 0.057$$

$$N = \left[\left(\frac{Z_{\alpha/2} + Z_{\beta}}{\frac{1}{2} \cdot \ln \left(\frac{1+r_s}{1-r_s} \right)} \right)^2 \cdot 1.06 \right] + 3,$$

where r_s is the Spearman rank correlation. When the difference is tested between the Spearman r_s and zero, r_s is the effect size.

Example. Suppose the Spearman rank correlation (r_s) between rangeland condition scores and precipitation is expected to be near 0.60. Then the sample size for calculating Spearman correlation coefficient (r_s) at 5% significance level and 80% power based on a two-tailed hypothesis is:

$$N = \left[\left(\frac{1.96 + 0.842}{\frac{1}{2} \cdot \ln \left(\frac{1+0.6}{1-0.6} \right)} \right)^2 \cdot 1.06 \right] + 3 = 20.3.$$

The required sample size is 21 after rounding up for a two-tailed hypothesis.

Power calculation for Spearman rank correlation. The power for Spearman rank correlation (r_s) is calculated as follows:

$$Z_{\beta} = \left(\frac{1}{2} \cdot \ln \left(\frac{1+r_s}{1-r_s} \right) \right) \cdot \sqrt{\frac{N-3}{1.06}} - Z_{\alpha/2},$$

where N is the sample size. The power is calculated using the value of Z_{β} from the table of standard normal probabilities.

Example. Suppose a researcher wishes to determine the Spearman rank correlation (r_s) between rangeland condition scores and precipitation using 25 sampling plots, and thinks that the correlation will be about 0.60. Then the power for Spearman rank correlation coefficient (r_s) at 5% significance level based on a two-tailed hypothesis is obtained as follows:

$$Z_{\beta} = \left(\frac{1}{2} \cdot \ln \left(\frac{1+0.6}{1-0.6} \right) \right) \cdot \sqrt{\frac{25-3}{1.06}} - 1.96 = 1.2.$$

The power for the value of $Z_{\beta} = 1.2$ is 0.88 from z-table.

Chi-square test using contingency table data. A Chi-square statistic is used to test the association or independence between two or more traits, when the data are in discrete categories (either nominal or ordinal). Chi-square test based on a contingency table is mainly used to test whether the occurrences of two plant species are associated, or two or more habitats contain equal number of plant species. Chi-square test can also be used for one sample case to test the differences in a plant characteristic (e. g., richness, density) among different life forms (e. g., geophytes, therophytes) or the differences in frequencies of two or more plant species (% number of sampling units that contain a plant species). This test can also detect if a certain type of habitat is more frequently selected by an animal, or if plant species differ in their proportion of coexistence with an organism (e. g., bacteria, fungus species) [17, 18].

Sample size calculation for chi-square test based on contingency table. The sample size for chi-square test based on contingency tables can be calculated using the following formula and Cohen's tables [4]. $N = N_{0.1} / 100w^2$, where $N_{0.1}$ is the necessary sample size for a given significance level, power and degrees of freedom (u) at $w = 0.1$ (read from the Cohen's table). The degrees of freedom for a contingency table with r rows and c columns is $u = (r-1)(c-1)$. w is the nontabulated effect size and is calculated as $w = \sqrt{\chi^2 / N}$, where χ^2 is the chi-square value calculated using the data of contingency table and N is the total number of samples. A part of the Cohen's sample size table for chi-square test at $\alpha = 0.05$ and $u = 6$ is presented below (Table 3).

Example. A researcher wants to compare the frequencies of four plant species in three vegetation types by calculating the number of quadrats containing the plant species. Let us assume that in a previous similar study, the chi-square calculated from data of a 3 · 4 table was 14 based on a sample of size (N) = 120. Then, the effect size, $w = \sqrt{(14/120)} = 0.34$. If the researcher wants to calculate the sample size assuming $w = 0.34$ for a new study, the required sample size at $\alpha = 0.05$ and 90% power is calculated as follows:

Table 3

N to detect w by χ^2 at $\alpha = 0.05$ and $u = 6$

Power	w								
	0.10	0.20	0.30	0.40	0.50	0.60	0.70	0.80	0.90
0.90	1742	435	194	109	70	48	36	27	22
0.95	2086	521	232	130	83	58	43	33	26
0.99	2805	701	312	175	112	78	57	44	35

Table 4

Presence/absence data of species A and B

Species	Species B		Total	
	Present	Absent		
Species A	Present	15	6	21
	Absent	7	22	29
	Total	22	28	$N = 50$

$u = (3-1) \cdot (4-1) = 6$. According to the Cohen's table (table 3), $N_{0.1} = 1742$ at $\alpha = 0.05$, power = 0.90, $u = 6$ and $w = 0.1$, then the sample size will be $N = 1742/100(0.34)^2 = 151$.

Sample size calculation for chi-square test based on 2 · 2 table. The sample size for a 2 · 2 contingency table ($df = 1$) can be obtained using the formula in the previous section and also using the following equation: $N = (\sqrt{\chi_c^2 + Z_\beta})^2 / w^2$.

χ_c^2 is the critical value of the chi-square obtained from chi-square distribution table based on a specified significance level and $df = 1$. For 5% significance level and $df = 1$, $\chi_c^2 = 3.84$ and for 1% significance level and $df = 1$, $\chi_c^2 = 6.63$, Z_β is standard normal variate for power and is 0.842 for 80% power (20% Type II error) and 1.282 for 90% power (10% Type II error). w is the effect size and is calculated as $w = \sqrt{\chi^2 / N}$, where χ^2 is the chi-square value calculated using the data of 2 · 2 table and N is the total number of samples. $\chi^2 = \sum (o_i - e_i)^2 / e_i$, where o_i and e_i are the observed and expected value for cell i respectively.

Example. In a study, the association between two plant species (A and B) was tested using chi-square. The data were obtained using located quadrats and summarized in a 2 · 2 table as follows (Table 4):

15 quadrats (cell *a*) contain both species A and B. In 6 quadrats (cell *b*) species A is present but not B. In 7 quadrats (cell *c*) species B is present but not A. In 22 quadrats (cell *d*) neither species A nor B are found. The expected value for each cell of the table is calculated as follows:

$$E(a) = \frac{21 \cdot 22}{50} = 9.24, \quad E(b) = \frac{21 \cdot 28}{50} = 11.76,$$

$$E(c) = \frac{22 \cdot 29}{50} = 12.76, \quad E(d) = \frac{28 \cdot 29}{50} = 16.24.$$

Then

$$\chi^2 = \frac{(15-9.24)^2}{9.24} + \frac{(6-11.76)^2}{11.76} + \frac{(7-12.76)^2}{12.76} + \frac{(22-16.24)^2}{16.24} = 11$$

and the effect size $w = \sqrt{11/50} = 0.469$.

Suppose a researcher wishes to test the association between two plant species (A and B) using data of a 2 · 2 table and chi-square test assuming $w = 0.47$ according to the previous study. Then, the required sample size

at 0.05 significance level and 80% power is: $N = (\sqrt{3.84 + 0.842})^2 / 0.47^2 = 35.5$. Therefore 36 quadrats are required for detecting the association between the two plant species.

Power calculation for chi-square test based on contingency table. The power for a chi-square test based on the data of a contingency table can be calculated using the following equation [19]:

$$Z_\beta = - \left[\left(\frac{\chi_c^2}{v + \lambda} \right)^{\frac{1}{3}} - \left(1 - \frac{2(v + 2\lambda)}{9(v + \lambda)^2} \right) \right] / \sqrt{\frac{2(v + 2\lambda)}{9(v + \lambda)^2}}$$

The power is calculated based on Z_β value from Z-table. v is degrees of freedom and is calculated for a contingency table with r rows and c columns as $v = (r - 1)(c - 1)$ and χ_c^2 is the critical value of the chi-square obtained from chi-square distribution table based on a specified significance level and degrees of freedom (v) and λ is the noncentrality parameter (calculated χ^2).

Example. According to the previous example (frequencies of four plant species in three vegetation types), if the χ^2 is expected to be 14 based on data of a 3 · 4 table using 120 plots, the power at $\alpha = 0.05$ is calculated as follows: $\lambda = 14$, $v = (3-1)(4-1) = 6$, table χ_c^2 for $\alpha = 0.05$ and $df = 6$ is 12.6,

$$Z_\beta = - \left[\left(\frac{12.6}{6+14} \right)^{\frac{1}{3}} - \left(1 - \frac{2(6+2(14))}{9(6+14)^2} \right) \right] / \sqrt{\frac{2(6+2(14))}{9(6+14)^2}} = +0.901.$$

The power obtained for $Z_\beta = +0.901$ from Z-table is 0.81.

Power calculation for chi-square using 2 · 2 table data. The power for a 2 · 2 contingency table can be calculated using the formula in the previous section. For a 2 · 2 table, the degrees of freedom is 1 and the critical chi-square value at $\alpha = 0.05$ is 3.84 and at $\alpha = 0.01$ is 6.63. The statistical power for a 2 · 2 contingency table can also be calculated using the following equation: $Z_\beta = (\sqrt{N} \cdot w) - \sqrt{\chi_c^2}$.

Table 5

Proportions in the cells of a 2 · 2 table for McNemar test

	Yes = 1	No = 0	
Yes = 1	$p_{11} = \frac{a}{N}$	$p_{10} = \frac{b}{N}$	$p_1 = p_{11} + p_{10}$
No = 0	$p_{01} = \frac{c}{N}$	$p_{00} = \frac{d}{N}$	$1 - p_1$
	$p_2 = p_{11} + p_{01}$	$1 - p_2$	1

Example. Suppose a researcher wants to use 50 plots for detecting the association using presence/absence data of two plant species in a 2 · 2 contingency table. The researcher expects that the chi-square will be about 11, that is the effect size $w = \sqrt{11/50} = 0.469$. The power at 0.05 significance level is obtained as follows: $Z_\beta = (\sqrt{50} \cdot 0.469) - \sqrt{3.84} = 1.36$. The power obtained for $Z_\beta = 1.36$ from Z-table is 0.91.

McNemar test is used to test the difference between paired proportions, particularly when the measurement is in either nominal or ordinal scale. McNemar test is mainly used for detecting the accuracy of classification in vegetation mapping based on comparing the performance of two classifiers. It has also been applied for detecting the changes in proportions of presence/absence data of plant species between two sites or two time periods [20, 21].

Sample size calculation for McNemar test.

The sample size for McNemar test using the proportions of the cells of 2 · 2 table (Table 5) is calculated as follows [22]:

$$N = \frac{[Z_{\alpha/2} \sqrt{\psi} + Z_\beta \sqrt{\psi - \delta^2}]^2}{\delta^2}$$

Where $\delta = p_{10} - p_{01}$ and $\psi = p_{10} + p_{01}$. The Odds ratio p_{10}/p_{01} is used to specify the effect size.

Example. A study was conducted to compare the performance of two classifiers for vegetation mapping. The data are presented in the following 2 · 2 table (Table 6). The number of pixels correctly classified by classifier 1, but incorrectly classified by classifier 2 is 175, and the number of pixels correctly classified by classifier 2, but incorrectly classified by classifier 1 is 125.

The proportion for each cell was obtained as follows (Table 7).

$$\delta = 0.35 - 0.25 = 0.1, \quad \psi = 0.35 + 0.25 = 0.6$$

Suppose a researcher wishes to compare the performance of two classifiers for vegetation mapping using data of a 2 · 2 table. The researcher assumes that $p_{10} = 0.35$ and $p_{01} = 0.25$ according to the previous study. Then, the required sample size for the chi-square test of McNemar at 5% significance level and 80% power for a two-sided test is calculated as follows:

$$N = [1.96\sqrt{0.6} + 0.842\sqrt{0.6 - 0.1^2}]^2 / 0.1^2 = 469.$$

Table 6

Number of pixels classified by the classifiers 1 and 2

	Classifier 2			Total
Classifier 1		correct	incorrect	
	correct	110	175	285
	incorrect	125	90	215
Total		235	265	500

Table 7

Calculated proportions for each cell of Table 5

	Classifier 2			Total
Classifier 1		correct	incorrect	
	correct	$p_{11} = \frac{110}{500} = 0.22$	$p_{10} = \frac{175}{500} = 0.35$	0.57
	incorrect	$p_{01} = \frac{125}{500} = 0.25$	$p_{00} = \frac{90}{500} = 0.18$	0.43
Total		0.47	0.53	1

Table 8

N to detect f by F test at $\alpha = 0.05$ and $u = 2$

power	f											
	0.05	0.10	0.15	0.20	0.25	0.30	0.35	0.40	0.50	0.60	0.70	0.80
0.80	1286	322	144	81	52	36	27	21	14	10	8	6
0.90	1682	421	188	106	68	48	35	27	18	13	10	8
0.95	2060	515	230	130	83	58	43	33	22	15	12	9
0.99	2855	714	318	179	115	80	59	46	29	21	16	12

Power calculation for McNemar test. The power for chi-square test of McNemar is calculated as follows:

$$Z_{\beta} = \frac{\sqrt{N\delta^2} - Z_{\alpha/2}\sqrt{\psi}}{\sqrt{\psi - \delta^2}}$$

The power is calculated using the value of Z_{β} from the table of standard normal probabilities.

Example. Returning to the previous example, if the researcher wishes to use 500 pixels for comparing the performance of two classifiers, assuming $p_{10} = 0.35$ and $p_{01} = 0.25$ the power for chi-square test of McNemar at 5% significance level based on a two-tailed test is calculated as follows:

$$Z_{\beta} = \frac{[\sqrt{500 \cdot 0.1^2} - 1.96\sqrt{0.6}]}{\sqrt{0.6 - 0.1^2}} = 0.934$$

The power for the value of $Z_{\beta} = 0.934$ is 0.823 from z-table.

Kruskal-Wallis test is used for comparing two or more independent samples. This statistic is used to test if there are differences in a vegetation characteristic (cover, biomass, density, richness, height, nutrient, rooting depth, number of seeds), vegetation index (e. g., Hill's diversity index, Pielou's index of non-randomness, leaf area index) or spectral vegetation index (NDVI, DVI) between two or more sites or between two or more species. It is also used to test the differences in a soil property (e. g., Ec, pH, organic matter, nutrients) or a climate variable (e. g., precipitation) between two or more sites [23, 24].

Sample size calculation for Kruskal-Wallis test (k groups with equal sizes). The sample

size for Kruskal-Wallis test is $(\pi/3) = 1.047$ times the sample size for ANOVA F-test [25]. The required sample size for ANOVA F-test can be obtained using Cohen's tables [4] based on the given significance level (α), power $(1 - \beta)$, effect size (f), number of groups (k) and the numerator degrees of freedom ($u = k - 1$). The effect size is defined as $f = \delta_m / \delta$, where δ_m is the standard deviation of means calculated as

$$\delta_m = \sqrt{\sum_{i=1}^k (m_i - m)^2 / k}$$

In this equation, m_i is the mean of group i and m is the mean of the means of the groups with equal sizes and k is the number of groups. δ is the within-population standard deviation and is calculated as $\delta = \sqrt{\sum \delta_i^2 / k}$, where δ_i is the standard deviation for each group. The sample size is then obtained using

$N = \frac{N_{0.05}}{400f^2} + 1$, where $N_{0.05}$ is the necessary sample size for the given α , u , and power at $f = 0.05$ (read from Cohen's table) and f is the nontabulated effect size. A part of the Cohen's table for obtaining sample size for ANOVA F-test at $\alpha = 0.05$ and $u = 2$ is presented below (Table 8).

Example. In a study, the height of trees was compared between three habitats using the mean height of the trees in four plots in each habitat (data are presented in the Table 9).

$$K = 3, u = 3 - 1 = 2, m = \frac{6 + 6.5 + 7.35}{3} = 6.62$$

$$\delta_m = \sqrt{\frac{(6 - 6.62)^2 + (6.5 - 6.62)^2 + (7.35 - 6.62)^2}{3}} = 0.557$$

$$\delta = \sqrt{\frac{0.445 + 0.515 + 0.502}{3}} = 0.698$$

Table 9

Height of trees within 4 plots in 3 habitats

Plot	Habitat		
	1	2	3
1	6.8	6.2	8.5
2	5.2	6.9	6.6
3	6.5	5.5	7.3
4	5.5	7.4	7
m_i	6	6.5	7.35
δ_i^2	0.445	0.515	0.502

$$f = \frac{0.557}{0.698} = 0.798$$

Suppose a researcher wishes to compare the height of trees between three habitats using the mean height of the trees in plots in each habitat. The researcher assumes that the effect size (f) will be around 0.78 according to a previous study. Then the sample size at 5% significance level and 80% power is calculated as follows:

$$N = \frac{1286}{400(0.78)^2} + 1 = 6.28.$$

$N_{0.05} = 1286$ is taken from Table 8. The required sample size for Kruskal-Wallis test is $1.047 \cdot 6.28 = 6.57$. Therefore, after rounding up, 7 samples are needed for each of the three groups and the total sample size is $7 \cdot 3 = 21$.

Sample size calculation for Kruskal-Wallis test (k groups with unequal sizes). When the compared groups are of unequal sizes, m , δ_m and δ is calculated as follows: $m = \sum n_i m_i / (n_1 + n_2 + \dots + n_k)$, where n_i is the size of group i and $\delta_m = \sqrt{\sum n_i (m_i - m)^2 / (n_1 + n_2 + \dots + n_k)}$ and

$\delta = \sqrt{\sum n_i \delta_i^2 / (n_1 + n_2 + \dots + n_k)}$. In a study, the height of trees was compared between three sites based on unequal replications (unequal number of plots). The data are presented in the table below (Table 10). $K = 3$, $u = 3 - 1 = 2$.

$$m = \frac{6(7.6) + 6(6.6) + 3(6.2)}{6 + 6 + 3} = 6.92$$

$$\delta_m = \sqrt{\frac{6(7.6 - 6.92)^2 + 6(6.6 - 6.92)^2 + 3(6.2 - 6.92)^2}{15}} = 0.574$$

$$\delta = \sqrt{\frac{6(0.5) + 6(0.39) + 3(0.42)}{15}} = 0.66$$

$$f = \frac{0.574}{0.66} = 0.87$$

Suppose a researcher wishes to compare the height of trees between three habitats based on

unequal number of plots. The researcher wants to detect an effect size (f) of 0.85 according to a previous study and plans that $n_1 = n_2$, and $n_3 = 0.5n_1$. Then the sample size at 5% significance level and 80% power is calculated as follows:

$N = \frac{1286}{400(0.85)^2} + 1 = 5.45$. The required sample size for Kruskal-Wallis test is $1.047 \cdot 5.45 = 5.7$ which is 6 after rounding up. This is the average n per sample. The total sample size is $6 \cdot 3 = 18$. The sample size for each group is obtained as follows: $n_1 + n_2 + n_3 = 18$, $n_1 + n_1 + 0.5n_1 = 2.5n_1 = 18$, then $n_1 = 7$, $n_2 = 7$ and $n_3 = 4$.

Power calculation for Kruskal-Wallis test (k groups with equal sizes). The power for Kruskal-Wallis test is $(3/\pi) = 95.5\%$ of the power of ANOVA F -test [25]. The statistical power for ANOVA F -test can be calculated using the following equation [4, 26]:

$$Z_\beta = \left[\sqrt{2(u + \lambda) - \frac{u + 2\lambda}{u + \lambda}} - \sqrt{(2v - 1) \frac{u F_c}{v}} \right] / \sqrt{\frac{u F_c}{v} + \frac{u + 2\lambda}{u + \lambda}}$$

The power is calculated based on Z_β value from Z-table. u is numerator degrees of freedom ($u = k - 1$) and k is the number of groups, λ is the noncentrality parameter and is calculated as $\lambda = f^2 n (u + 1) = f^2 N$ and f is the effect size as explained before, n is the average sample size per group ($n = N/k$) and N is the total sample size, v is the denominator (error) degrees of freedom ($v = N - k$), F_c is the critical F -value obtained from F -distribution table using the given significance level (α), numerator degrees of freedom (u) and denominator (error) degrees of freedom (v).

Example. Following the example in the previous section (height of trees with equal sizes), if the researcher wishes to use 4 plots in each habitat for comparing the heights of plants between three habitats, what is the power of

Table 10

Height of trees in three sites with unequal replications

No. of plot	Site		
	1	2	3
1	8.5	7.1	6.8
2	7.3	6.5	5.3
3	8.6	6.2	6.5
4	6.7	6.9	–
5	7.4	5.5	–
6	7.1	7.4	–
m_i	7.6	6.6	6.2
δ_i^2	0.5	0.39	0.42
n_i	6	6	3

Kruskal-Wallis test at 5% significance level, with assuming : $f = 0.78$: $n = 12/3 = 4$, $u = 3 - 1 = 2$, $\lambda = 0.78^2 \cdot 4 \cdot (2 + 1) = 7.3$. The critical F -value at $\alpha = 0.05$, numerator $df = 2$, and error $df = 9$ is 4.26 from F-table.

$$Z_{\beta} = \left[\sqrt{\frac{2(2+7.3) - \frac{2+2(7.3)}{2+(7.3)}}{(2(9)-1) \frac{2(4.26)}{9}}} \right] / \sqrt{\frac{2(4.26)}{9} + \frac{2+2(7.3)}{2+7.3}} = 0.05$$

The power obtained for $Z_{\beta} = 0.05$ from Z-table is 0.52 for ANOVA F-test. The power for Kruskal-Wallis test is $95.5\% \cdot 0.54 = 0.50$.

Power calculation for Kruskal-Wallis test (k groups with unequal sizes)

Example. Following the example in the previous section (height of trees with unequal sample sizes), the researcher assumes $f = 0.85$ and wishes to use 6 plots in habitat 1, 6 plots in habitat 2 and 3 plots in habitat 3 for comparing the height of trees between the three habitats. Then power at 5% significance level is calculated as follows: $f = 0.85$, $N = 6 + 6 + 3 = 15$, $n = 15/3 = 5$, $u = 3 - 1 = 2$, $v = 15 - 3 = 12$, $\lambda = 0.85^2 \cdot 5 \cdot (2 + 1) = 10.84$. The critical F -value at $\alpha = 0.05$, numerator $df = 2$, and error $df = 12$ is 3.89 from F-table.

$$Z_{\beta} = \sqrt{\frac{2(2+10.84) - \frac{2+2(10.84)}{2+(10.84)}}{((2 \cdot 12) - 1) \frac{2(3.89)}{12}}} / \sqrt{\frac{2(3.89)}{12} + \frac{2+2(10.84)}{2+10.84}} = 0.646$$

The power obtained for $Z_{\beta} = 0.646$ from Z-table is 0.74 for ANOVA F-test. The power for Kruskal-Wallis test is $95.5\% \cdot 0.74 = 71\%$.

Results and Discussion

The formulas explained in this study can be used to calculate sample size and power for nonparametric tests, that do not make any assumption about the distribution of data. A number of vegetation characteristics are nominal (e. g., presence/absence data of vegetation) and ordinal (e. g., rangeland condition scores) and therefore appropriate sample size equations are required to efficiently analyze these types of data through nonparametric tests. In addition, although most of vegetation characteristics such as biomass, density, plant height, richness and seed production are in ratio scale and reported to be normally distributed [27, 28], some research have revealed that the distribution of these data is not normal [29]. Therefore the distribution of ratio data of vegetation should be detected using Kolmogorov-

Smirnov or Shapiro-Wilk tests before selecting a statistical analysis test. If the data are not normally distributed, they can be normalized by resampling with a larger sample size (N) or by using transformation methods such as log, square root, and Arcsine, and then a parametric test can be used. However, if the data were not normalized, a nonparametric test and as a result an appropriate sample size equation for the test is required. In a number of sample size software, the power and sample size for a nonparametric test is calculated by multiplying a correction factor to the power and sample size of its equivalent parametric test. For example, the power for the paired-samples Wilcoxon signed rank test is considered to be 95.5% of the power of paired samples t-test, for the Mann-Whitney U test, it is 95.5% of the power of two independent samples t-test [30], the power for the Kruskal-Wallis test is 95.5% of the power of ANOVA F-test [25] and for the Spearman rank correlation it is 91% of the power of Pearson correlation test [31]. However, calculation of sample size and power for a nonparametric test by using an appropriate sample size and power equation which is relevant and specific to the nonparametric test appears to be more effective and accurate. A power of 80% is recommended by researchers as an efficient power for vegetation studies, but in most vegetation research the reported power is about 40% which seems to be very low [32]. A low power in a study may lead to obtaining a non-significant result despite that there may be an ecologically powerful and significant effect or difference. Therefore an adequate sample size should be selected for achieving an efficient power in design stage and before data collection. One way to improve the power of a test with an inadequate sample size is to use one-tailed hypothesis if possible. A one-tailed test requires a lower sample size than a two-tailed test to achieve the same level of power as a two-tailed test, but it can be used when the effect in one direction can be explained [32]. For example, a one-tailed test can be used to determine whether plant biomass or cover is greater in ungrazed sites than in grazed sites or plant production is higher in the habitats with higher precipitation than the habitats with lower precipitation. Another solution for increasing the power of a test is to select a higher significance level (e. g., 5% instead of 1%).

Conclusions

In this study, appropriate sample size and power equations were explained according to the measurement scale of vegetation data (nominal,

ordinal, interval and ratio), type of vegetation research and the nonparametric test used for analyzing vegetation data. If an adequate sample size is not taken for a vegetation study, a non-significant result may be obtained due to a low power even if there is an ecologically strong effect or difference. Power and sample size calculation is more valuable in the design or planning stages of research than after data collection. However if power is calculated after data collection and testing the hypothesis, presenting significance level and sample size along with the estimated power can provide important information about the null hypothesis that was not rejected.

References

1. Siegel S. Nonparametric statistics for the behavioral sciences. New York: McGraw-Hill Companies, 1956. 312 p.
2. Federal Register // Rules and regulations. 1979. V. 44. No. 50. P. 14533–15463.
3. Mosley J.C., Bunting S.C., Hironaka M. Quadrat and sample sizes for frequency sampling mountain meadow vegetation // The Great Basin Naturalist. 1989. V. 49. P. 241–248.
4. Cohen J. Statistical power analysis for the behavioral sciences. New York: Lawrence Erlbaum Associates, 1988. 567 p. doi: 10.4324/9780203771587
5. Suresh K.P., Chandrashekar S. Sample size estimation and power analysis for clinical research studies // Journal of Human Reproductive Sciences. 2012. V. 5. No. 1. P. 7–13. doi: 10.4103/0974-1208.97779
6. Peek M.S., Leffler A.J., Flint S.D., Ryel R.J. How much variance is explained by ecologists? Additional perspectives // Oecologia. 2003. V. 137. No. 2. P. 161–170. doi: 10.1007/s00442-003-1328-y
7. Moffet C.A. Agreement between measurements of shrub cover using ground-based methods and very large scale aerial imagery // Rangeland Ecology & Management. 2009. V. 62. No. 3. P. 268–277. doi: 10.2111/08-244r.1
8. Conser C., Connor E.F. Assessing the residual effects of *Carpobrotus edulis* invasion, implications for restoration // Biological Invasions. 2009. V. 11. No. 2. P. 349–358. doi: 10.1007/s10530-008-9252-z
9. Vanha Majamaa I., Salemaa M., Tuominen S., Mikkola K. Digitized photographs in vegetation analysis a comparison of cover estimates // Applied Vegetation Science. 2000. V. 3. No. 1. P. 89–94. doi: 10.2307/1478922
10. Stanisci A., Frate L., Morra Di Cella U., Pelino G., Petey M., Siniscalco C., Carranza M.L. Short-term signals of climate change in Italian summit vegetation: observations at two GLORIA sites // Plant Biosystems—An International Journal Dealing with all Aspects of Plant Biology. 2016. V. 150. No. 2. P. 227–235. doi: 10.1080/11263504.2014.968232
11. Noether G.E. Sample size determination for some common nonparametric tests // Journal of the American Statistical Association. 1987. V. 82. No. 398. P. 645–647. doi: 10.1080/01621459.1987.10478478
12. Graf U., Wildi O., Küchler M., Ecker K. Five-year changes in Swiss mire vegetation // Botanica Helvetica. 2010. V. 120. No. 1. P. 15–27. doi: 10.1007/s00035-010-0071-3
13. Schmidt K.S., Skidmore A.K. Spectral discrimination of vegetation types in a coastal wetland // Remote Sensing of Environment. 2003. V. 85. No. 1. P. 92–108. doi: 10.1016/s0034-4257(02)00196-7
14. Seaquist J.W., Hickler T., Eklundh L., Ardö J., Heumann B.W. Disentangling the effects of climate and people on Sahel vegetation dynamics // Biogeosciences. 2009. V. 6. No. 3. P. 469–477. doi: 10.5194/bg-6-469-2009
15. Kopecky M., Cizkova S. Using topographic wetness index in vegetation ecology: does the algorithm matter? // Applied Vegetation Science. 2010. V. 13. No. 4. P. 450–459. doi: 10.1111/j.1654-109x.2010.01083.x
16. Fieller E.C., Hartley H.O., Pearson E.S. Tests for rank correlation coefficients // Biometrika. 1957. V. 44. No. 3. P. 470–481. doi: 10.1093/biomet/44.3-4.470
17. Yeaton R.I., Esler K.J. The dynamics of a succulent Karoo vegetation // Vegetatio. 1990. V. 88. No. 2. P. 103–113. doi: 10.1007/bf00044827
18. Radomski P., Goeman T.J. Consequences of human lakeshore development on emergent and floating-leaf vegetation abundance // North American Journal of Fisheries Management. 2001. V. 21. No. 1. P. 46–61. doi: 10.1577/1548-8675(2001)021<0046:cohldo>2.0.co;2
19. Milligan G.W. A computer program for calculating power of the chi-square test // Educational and Psychological Measurement. 1979. V. 39. No. 3. P. 681–684. doi: 10.1177/001316447903900324
20. Milberg P., Bergstedt J., Fridman J., Odell G., Westerberg L. Observer bias and random variation in vegetation monitoring data // Journal of Vegetation Science. 2008. V. 19. No. 5. P. 633–644. doi: 10.3170/2008-8-18423
21. Zhang C., Xie Z. Object-based vegetation mapping in the Kissimmee River watershed using HyMap data and machine learning techniques // Wetlands. 2013. V. 33. No. 2. P. 233–244. doi: 10.1007/s13157-012-0373-x
22. Connor R.J. Sample size for testing differences in proportions for the paired-sample design // Biometrics. 1987. V. 43. P. 207–211. doi: 10.2307/2531961
23. Malizia A.I., Kittlein M.J., Busch C. Influence of the subterranean herbivorous rodent *Ctenomys talarum* on vegetation and soil // Zeitschrift für Säugetierkunde. 2000. V. 65. No. 3. P. 172–182.
24. Bistea E., Mahy G. Vegetation and seed bank in a calcareous grassland restored from a *Pinus* forest // Applied Vegetation Science. 2005. V. 8. No. 2. P. 167–174. doi: 10.1111/j.1654-109x.2005.tb00642.x
25. Andrews F.C. Asymptotic behavior of some rank tests for analysis of variance // The Annals of Math-

emathical Statistics. 1954. V. 25. P. 724–736. doi: 10.1214/aoms/1177728658

26. Laubscher N.F. Normalizing the noncentral t and F distributions // Annals of Mathematical Statistics. 1960. V. 31. No. 4. P. 1105–1112. doi: 10.1214/aoms/1177705682

27. Hoch G., Körner C. Growth and carbon relations of tree line forming conifers at constant vs. variable low temperatures // Journal of Ecology. 2009. V. 97. No. 1. P. 57–66. doi: 10.1111/j.1365-2745.2008.01447.x

28. Giannini V., Bertacchi A., Bonari E., Silvestri N. Rewetting in Mediterranean reclaimed peaty soils and its potential for phyto-treatment use // Journal of environmental management. 2018. V. 208. P. 92–101. doi: 10.1016/j.jenvman.2017.12.016

29. Murphy S.M., Vidal M.C., Smith T.P., Hallagan C.J., Broder E.D., Rowland D., Cepero L.C. Forest fire severity affects host plant quality and insect herbivore damage //

Frontiers in Ecology and Evolution. 2018. V. 6. P. 1–11. doi: 10.3389/fevo.2018.00135

30. Mood A.M. On the asymptotic efficiency of certain nonparametric two-sample tests // The Annals of Mathematical Statistics. 1954. V. 25. P. 514–522. doi: 10.1214/aoms/1177728719

31. Hotelling H., Pabst M.R. Rank correlation and tests of significance involving no assumption of normality // The Annals of Mathematical Statistics. 1936. V. 7. No. 1. P. 29–43. doi: 10.1214/aoms/1177732543

32. Jennions M.D., Møller A.P. A survey of the statistical power of research in behavioral ecology and animal behavior // Behavioral Ecology. 2003. V. 14. No. 3. P. 438–445. doi: 10.1093/beheco/14.3.438

33. Ruxton G.D., Neuhauser M. When should we use one tailed hypothesis testing? // Methods in Ecology and Evolution. 2010. V. 1. No. 2. P. 114–117. doi: 10.1111/j.2041-210x.2010.00014.x

Modeling of the vertical structure of shade trees in cacao agroforestry systems

© 2023. B. Sánchez-Díaz¹ ORCID: 0000-0003-4165-4302¹, L. Ríos-Rodas² ORCID: 0000-0001-9414-5558²,
A. Sol-Sanchez³ ORCID: 0000-0001-9138-641X³, A. del Rosario Fraire-Vazquez¹ ORCID: 0000-0002-6555-355X¹,
J. del Carmen Geronimo-Torres² ORCID: 0000-0001-9546-3339², R. Solís-Silvan¹ ORCID: 0000-0001-6373-0893¹

¹Tecnológico Nacional de México, Campus Comalcalco,
Comalcalco-Paraíso KM 2, RA Occidente 3ra sección,
86650, Comalcalco, Tab., Mexico,

²Universidad Autónoma de Chiapas: Escuela Maya de Estudios Agropecuarios – Carretera
Catazajá – Palenque Km. 4, 29980, Catazajá, Chis., Mexico,

³Colegio de postgraduados Campus Tabasco – Periférico Carlos A. Molina S/N Km. 3,
Periférico Carlos A Molina SN, Ranchería Río Seco y Montaña,
86500, Heroica Cárdenas, Tab., Mexico,
e-mail: rudy.solis@comalcalco.tecnm.mx

Cacao agrosystems can provide available habitats for wildlife species, due to the structure and diversity of established shade trees in plantations. The objective of this research is to calculate the index of importance and forest value of shade trees used in cacao agrosystems. Field sampling was carried out to collect data on breast height diameter, canopy diameter and canopy height, these variables were used to estimate the importance value index and the forest value index. The trees with the best indexes of importance and forest value are *Erythrina americana* (*IVI* = 62.34 and *FVI* = 50.94), *Bursera simaruba* (*IVI* = 62.53 and *FVI* = 66.99) and *Samanea saman* (*IVI* = 56, 85 and *FVI* = 42.93). The vertical structure of cacao agrosystems is important since it could be used as an input variable to evaluate and predict, through an ecological niche model, the quality of the available habitat for the conservation of wildlife such as birds, reptiles and arboreal mammals.

Keywords: biodiversity conservation, canopy height, Forest value index.

УДК 630

Моделирование вертикальной структуры тенистых деревьев в системах агролесоводства какао

© 2023. Б. Санчес-Диас¹, PhD, исследователь,
Л. Риос-Родас², PhD, исследователь, А. Сол-Санчес³, PhD, исследователь,
А. дель Росарио Фрайре-Васкес¹, исследователь,
Х. дель Кармен Джеронимо-Торрес², PhD, исследователь,
Р. Солис-Сильван¹, PhD, исследователь,

¹Высший технологический институт Комалькалько,
дорога Комалькалько-Параизо KM 2, RA Оксиденте
3-я сексьон, Комалькалько, Табаско, 86650, Мексика,

²Автономный университет Чьяпаса:

Школа сельскохозяйственных исследований майя,
4 км, шоссе Катасаха-Паленке, Катасаха, Чьяпас, 29980, Мексика,

³Кампус Высшей школы Табаско,
Периферико Карлос А. Молина S/N Km. 3, Ранчерия Рио Секо и Монтанья,
86500, Героика Карденас, Табаско, Мексика,
e-mail: rudy.solis@comalcalco.tecnm.mx

левые исследования были проведены для получения данных о диаметре на высоте груди, диаметре и высоте полога. Эти переменные использовались для оценки индекса важности и индекса ценности леса. Деревья с лучшими показателями важности и лесной ценности – *Erythrina americana* ($IVI = 62,34$ и $FVI = 50,94$), *Bursera simaruba* ($IVI = 62,53$ и $FVI = 66,99$) и *Samanea saman* ($IVI = 56,85$ и $FVI = 42,93$). Вертикальная структура агросистем какао важна, поскольку её можно использовать в качестве входной переменной для оценки и прогнозирования с помощью модели экологической ниши качества доступной среды обитания для сохранения диких животных, таких как птицы, рептилии и древесные млекопитающие.

Ключевые слова: сохранение биоразнообразия, высота полога, индекс ценности леса.

Due to anthropogenic activities in ecosystems, fragmentation, and habitat loss, how the main causes of biodiversity loss at all global, national, and local levels, have modified ecosystem services [1, 2]. Agrosystems (intentional management of shade trees with acrops) have the potential to provide habitats, to conserve wildlife species in highly modified tropical landscapes [3, 4]. Coffee and cacao agrosystems are the best known, and often have a high canopy of various shade tree species [5]. So, these shade trees are very important, and vary widely: 1) polycultural system (multiple species of shade trees planted with forest species), where crop trees are interspersed, with other shade trees planted and cacao, 2) monocultural shade, where the shadow is dominated by one or some tree species, 3) diverse shade systems, where most trees vary from 30 to 40 plant species, in which fruit and timber species are inserted, where The spine, usually are fast-growing nitrogen fixation legumes, include *Erythrina* spp., *Gliricidia sepium*, *Samanea saman*, and *Inga* spp. [6].

In cacao agrosystems (*Theobroma cacao*) worldwide, some shade trees are used that are also present in plantations in Mexico. In Ghana *Persea americana*, *Citrus senensis*, *Gliricidia sepium*, *Persea americana*, *Ceiba pentandra*, *Cedrela odorata* and *Spondias mombin* [7–10]. In Brazil *Spondias mombin*, *Cedrela odorata*, *Guazuma ulmifolia*, *Ceiba pentandra* and *Genipa americana* [11, 12]. In Colombia *Spondias mombin*, *Psidium guajava*, *Swietenia macrophylla*, *Cordia alliodora*, *Annona muricata*, *Guazuma ulmifolia*, *Artocarpus altilis*, *Pouteria caimito*, *Glyceridia sepium*, *Persea americana*, *Musa paradisiaca*, *Cedrela odorata* and *Ceiba pentandra* [13–15]. In Bolivia *Cedrela odorata*, *Spondian mombin* and *Guazuma ulmifolia* [16]. In Cameroon *Ceiba pentandra*, *Citrus reticulata*, *C. sinensis*, *Persea americana*, *Psidium guajava*, *Spondias mombin*, *Manguifera indica* and *Musa paradisiaca* [17, 18]. In Costa Rica *Carica papaya*, *Castilla elastica*, *Cedrela odorata*, *Cocos nucifera*, *Genipa americana*, *Gliricida sepium*, *Leucaena leucocephala*, *Spondias mombin* and *Samanea saman* [19]. In Nigeria *Citrus sinensis*,

Manguifera indica, *Psidium guajava*, *Citrus reticulata*, *Persea americana*, *Cocos nucifera*, *Ceiba pentandra* and *Spondias mombin* [20]. In Indonesia *Manguifera indica* and *Swietenia macrophylla* [21, 22]. In Ecuador *Cedrela odorata* [23]. In Peru *Cedrela odorata*, *Persea americana* and *Swietenia macrophylla* [24].

The variety of trees established as shade in cacao plantations, are valuable spaces for wildlife conservation, providing habitat for insects, birds, amphibians, reptiles, and mammals [25–28]. Cacao is one of the main crops that can be associated with a great diversity of trees used as shade [29]. Globally, the most commonly used shade trees in cacao plantations are *Spondias mombis*, *Cedrela odorata*, *Persea americana*, *Mangifera indica*, and *Citrus sinensis* [10, 19, 20, 30, 31]. In Tabasco, the most common shade trees in cacao trees are *Guazuma ulmifolia*, *Ceiba pentandra*, *Erythrina americana* and *Samanea saman* [32–35]; where mammals such as the howler monkey (*Alouatta palliata*) endangered species (Sernapam NOM-059), has adapted, using these agrosystems as a refuge. In addition, the red list of the International Union for the Conservation of Nature (IUCN) considers *A. palliata mexicana* as critically endangered.

The objective of this research is to calculate the index of importance and forest value of the shade trees frequently used in cacao agrosystems, as available habitats for the conservation of wildlife species.

Objects and Methods

Characterization of the study area. The study was carried out in six different cacao agrosystems (Fig. 1, see color insert I). In the state of “Tabasco”, Mexico. In this investigation, three different cacao agrosystems were selected as study sites.

Sampling procedure. For the sampling of the vegetation structure in the cacao agrosystems, the 3 study sites were used (Table 1), in which 10 plots of 25 × 10 m were selected in each, each plot had an area of 250 m², taking into account what is suggested by [36], for a total of 30 Temporary Sample Plot (TSP), where

Table 1

Study sites	Location	Coordinates, m (UTM, WGS84)		Area	Source
		X	Y		
SA 1	Aldama	461830	2017193	21.08 ha	[32]
SA 2	Carlos Greene	454416	2016030	49.59 ha	[37]
SA 3	Zapotal	471172	2023367	57.82 ha	[38]



Fig. 2. Vertical structure of the cacao agroecosystem with shade trees [13]

the diameter at breast height (*DBH*), total height and crown diameter (all individuals with $DBH \geq 1.3$ m) were recorded.

Characterization of the vertical structure.

The cacao agrosystems are integrated polycultivation plots where all major plant types are represented in layers and tiers from the open sun to the closed shade (Fig. 2).

Dasometric variables. The trees were taxonomically identified and geo-referenced with GPS. The dasometric variables recorded were the diameter at breast height (DBH 1.3 m) and crown diameter, measured with a tape measure, and total height (Ht) with a clinometer [39].

Diameter at breast height (DBH). Once the plots were established, a direct determination of the diameter at breast height (DBH) of all the trees present in each of the TSPs was carried out, making a single reading per tree, where $DBH = C/\pi$.

Determination of canopy height. Due to the practical difficulties in measuring canopy heights directly, through an indirect method, was used by a clinometer to measure the angles of the tree base (θ), the canopy (ρ) and the horizontal distance (hd), using the following basic trigonometric formula: $Ht = hd(\tan\rho + \tan\theta)$.

Determination of crown diameter (CD).

For the determination of the crown diameter present in each *TSP*, the projection of these was measured in two directions, mainly North-South and East-West, taking as reference the projection of the ends of the same on the ground $CD = (cd1+cd2)/2$ [68].

Basal Area Calculation. With the measurements data, a database was generated, with which the calculation of the Basal Area (BA), cross-sectional area of the tree, measured at 1.30 m height was determined and calculated by the following formula: $BA = 0.7854 \cdot DBH^2$, where $BA = Basal\ area\ in\ m^2$ and $DBH = diameter\ at\ breast\ height\ in\ m^2$.

Importance Value Index. The importance value index (IVI) defines which of the species present contribute to the character and structure of an ecosystem, which is obtained from the study of structural variables such as abundance, dominance, coverage, and frequency [40]. It was calculated as follows: $IVI = Relative\ dominance + Relative\ density + Relative\ frequency$.

The dominance (biomass estimator: basal area, coverage) relative was obtained as follows: $Relative\ dominance = (Absolute\ dominance\ per\ each\ tree) / (Absolute\ dominance\ of\ all\ trees) \cdot 100$,

**B. Sánchez-Díaz, L. Ríos-Rodas,
A. Sol-Sanchez, A. del Rosario Fraire-Vazquez,
J. del Carmen Geronimo-Torres, R. Solís-Silvan
"Modeling of the vertical structure of shade trees
in cacao agroforestry systems". P. 28.**

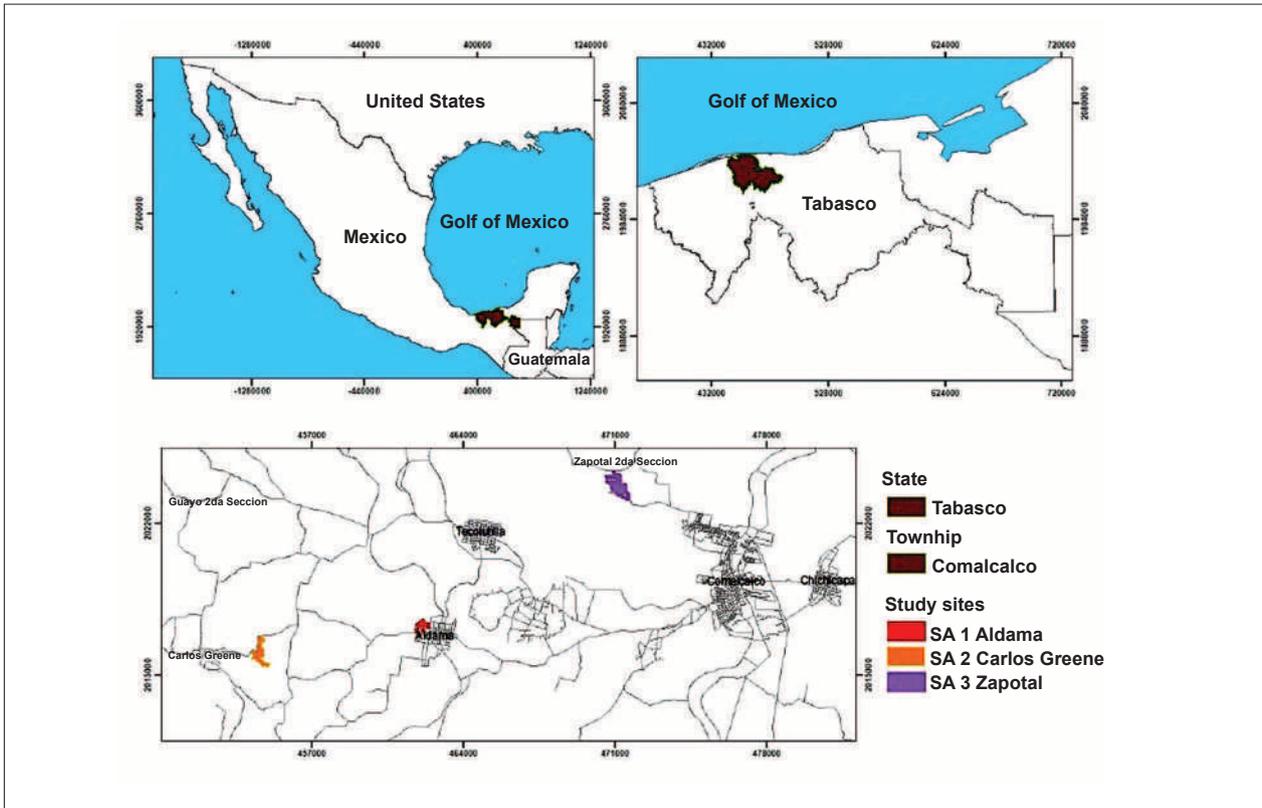


Fig. 1. Cacao agrosystems used as study sites

Table 2

Tree species are found in three cacao agrosystems in Comalcalco, Tabasco

Family	Scientific name	Height (m)	Agrosystems		
			SA 1	SA 2	SA 3
Anacardiaceae	<i>Mangifera indica</i>	10–30	X		
	<i>Spondias mombin</i>	10–30	X	X	X
	<i>S. purpurea</i>	3–8	X		
Annonaceae	<i>Annona muricata</i>	3–8	X		
	<i>A. reticulata</i>	6–8			X
Bignoniaceae	<i>Tabebuia rosea</i>	10–30	X	X	X
Burseraceae	<i>Bursera simaruba</i>	20–35		X	
Fabaceae	<i>Erythrina americana</i>	10–30	X	X	
	<i>Inga jinicuil</i>	12–15		X	X
	<i>Gliricidia sepium</i>	12–20	X		
	<i>Tamarindus indica</i>	10–30		X	X
	<i>Samanea saman</i>	25–50		X	X
	<i>Leucaena leucocephala</i>	3–6			X
Lauraceae	<i>Cinnamomum zeylanicum</i>	10–15		X	
	<i>Persea schiedeana</i>	8–25	X		
	<i>Persea americana</i>	10–20		X	X
Malpighiaceae	<i>Byrsonima crassifolia</i>	3–7			X
Malvaceae	<i>Ceiba pentandra</i>	20–70	X		X
	<i>Guazuma ulmifolia</i>	8–15		X	
Meliaceae	<i>Cedrela odorata</i>	10–35	X	X	X
	<i>Swietenia macrophylla</i>	35–50			X
Moraceae	<i>Artocarpus altilis</i>	12–21	X		
	<i>Castilla el stica</i>	20–25			X
Myrtaceae	<i>Pimenta dioica</i>	6–8	X		
	<i>Psidium guajava</i>	3–10			X
	<i>Syzygium jambos</i>	10–16		X	
Rutaceae	<i>Citrus latifolia</i>	3–6			X
	<i>C. sinensis</i>	9–10	X		
	<i>C. nobilis</i>	2–6		X	
	<i>C. aurantium</i>	3–5			X
Sapindaceae	<i>Talisia olivaeformis</i>	15–20			X
	<i>Nephelium lappaceum</i>	12–20	X		
Sapotaceae	<i>Chrysophyllum cainito</i>	10–25		X	
	<i>Manilkara sapota</i>	25–30		X	
	<i>Pouteria sapota</i>	15–45	X		X
Oxalidaceae	<i>Averrhoa carambola</i>	3–5		X	
Bixaceae	<i>Bixa orellana</i>	2–5	X		
Boraginaceae	<i>Cordia alliodora</i>	7–25		X	
Caricaceae	<i>Carica papaya</i>	2–8			X
Musaceae	<i>Musa paradisiaca</i>	1–3		X	
Muntingiaceae	<i>Muntingia calabura</i>	3–8		X	
Rubiaceae	<i>Genipa americana</i>	15–25	X		

Table 3

Tree species with the highest importance value (IVI) and forest value indices in the three cacao-based agrosystems

Species	IVI	Species	FVI
SA 1		SA 1	
<i>Erythrina americana</i>	62.34	<i>Erythrina americana</i>	50.94
<i>Cedrela odorata</i>	46.64	<i>Ceiba pentandra</i>	49.06
<i>Tabebuia rosea</i>	39.03	<i>Mangifera indica</i>	41.30
<i>Mangifera indica</i>	25.32	<i>Artocarpus altilis</i>	35.22
<i>Artocarpus altilis</i>	22.91	<i>Spondias mombin</i>	28.12
Twelve remaining species	103.76	Twelve remaining species	95.36
SA 2		SA 2	
<i>Bursera simaruba</i>	62.53	<i>Bursera simaruba</i>	66.99
<i>Cedrela odorata</i>	50.86	<i>Samanea saman</i>	49.19
<i>Samanea saman</i>	36.92	<i>Spondias mombin</i>	37.89
<i>Tabebuia rosea</i>	36.25	<i>Cedrela odorata</i>	24.92
<i>Inga jinicuil</i>	26.39	<i>Tabebuia rosea</i>	21.40
Fourteen remaining species	87.05	Fourteen remaining species	99.61
SA 3		SA 3	
<i>Samanea saman</i>	56.85	<i>Samanea saman</i>	42.93
<i>Tabebuia rosea</i>	56.02	<i>Ceiba pentandra</i>	36.98
<i>Ceiba pentandra</i>	31.31	<i>Pouteria sapota</i>	35.78
<i>Spondias mombin</i>	30.76	<i>Tabebuia rosea</i>	33.45
<i>Cedrela odorata</i>	23.86	<i>Persea americana</i>	29.54
Fifteen remaining species	101.20	Fifteen remaining species	121.32

Table 4

Density, height, basal area, and cover of shade trees in cacao agrosystems

Indicators	Camerún	Indonesia	Mexico	Ghana	Ecuador	Costa Rica
Canopy coverage (%)	87.8±7.4	78.7±0.4	72.75±5.74	51.6±3.67	72±27	66.0±18.1
Tree species (no.)	11.0±0.0	20.8±7.8	11.93±0.94	10.8±1.27	17±5	15.8±5.8
Tree density (tree/ha)	51.3±12.0	77.5±21.1	45.75±3.89	49.0±9.7	54.6±33.2	61.0±22.1
Tree height (m)	55.5±3.3	11.56±0.49 9.47±0.26	11.28±0.69	15.1±0.74	12.1±1.0	21.1±3.6
Basal area (m ² /ha)	48.7±14.6	56.7±9.10	34.1±2.86	42.8±2.5	37.7±5.1	25.5±7.4
Source	[5, 17, 42]	[43–46]	[47, 48]	[7, 8, 49]	[23, 50]	[51–53]

where: *Absolute dominance* = (*Basal area of a tree*)/(*Sampled area*).

The basal area (BA) was obtained with the following equation:

$$BA = \frac{\pi}{4} DBH^2.$$

The relative density is calculated as follows:
Absolute density = (*Number of individuals in a tree*)/(*Sampled area*)

Relative density = (*Absolute density per each tree*)/(*Absolute density of all trees*) · 100,

where: The relative frequency is calculated as follows:

Relative density = (*Absolute density per each tree*)/(*Absolute density of all trees*) · 100,

where: *Absolute frequency* = (*Number of frames in which each tree is presented*)/(*Total number of sampled frames*).

Forest Value Index. The forest value index (FVI) proposed by [41], which is made up of the relative values of the diameter, height, and coverage of the species in the area. It was calculated as follows: *FVI* = *Relative diameter* + *Relative height* + *Relative cover*.

The relative diameter was obtained by the equation:

Relative diameter = (*Absolute diameter per each tree*)/(*Absolute diameter of all trees*) · 100,

where: *Absolute diameter* = (*Diameter of a tree*)/(*Sampled area*).

The relative height was obtained by the equation:

$$\text{Relative height} = (\text{Absolute height per each tree}) / (\text{Absolute height of all trees}) \cdot 100,$$

where: $\text{Absolute height} = (\text{Height of a tree}) / (\text{Sampled area})$.

The relative coverage was obtained through the equation:

$$\text{Relative coverage} = (\text{Absolute coverage per each tree}) / (\text{Absolute coverage of all trees}) \cdot 100,$$

where: $\text{Absolute coverage} = (\text{Coverage of a tree}) / (\text{Sampled area})$.

Results

Field sampling. The family with the highest presence of species was Fabaceae with four species. The Malvaceae and Sapotaceae families presented three species each, while the Anacardiaceae, Bignoniaceae, Lauraceae, Meliaceae, Moraceae, and Rutaceae families each, had two species (Table 2).

Ecological importance value index. The tree species with the highest structural values in each agrosystem were the same in both indices, *Erythrina americana* ($IVI = 62.34$ and $FVI = 50.94$), *Bursera simaruba* ($IVI = 62.53$ and $FVI = 66.99$), and *Inga jinicuil* ($IVI = 56.85$ and $FVI = 42.93$) (Table 3).

Review of structural characteristics in shade tree vegetation in cacao agrosystems. A literature review of the structural characteristics of shade tree vegetation in cacao agrosystems was carried out worldwide (Table 4).

Discussion

Due to the fragmentation and loss of habitat, species such as insects, amphibians, reptiles, birds and mammals have needed to take refuge in cacao and coffee agrosystems [25, 32, 54], in no way can these types of available habitats be compared with rainforests, which due to their biotic and abiotic processes would be the ideal habitats for many species. However, in the case of some endangered species, agrosystems are the only habitat available, because, due to their diversity of trees and different strata in their canopies, they have the potential to provide habitats for the conservation of species of wildlife [3, 4]. The different strata in cacao plantations, allow obtaining various benefits and natural services such as water collection and purification, soil conservation, crop pollination, carbon sequestration, organic waste decomposition, species conservation, ultraviolet rays protection, partial stabilization of the climate, and the aesthetic

beauty of natural environments [55]. Therefore, economic incentives or payment for environmental services could be provided to small producers, so that they conserve and improve the tree cover of their cacao plantations [56].

The vertical stratification of vegetation contributes to the plant-animal interaction, population dynamics, and the evolution of the life history of animals that depend on plants for food [57, 58]. In addition, abiotic and biotic factors influence structural aspects such as canopy height and geographic distribution of species, which is important for maintaining different strata and abundance of trees [59]. Vertical stratification in rainforests and cacao agrosystems is very important because of their composition, structure, and diversity since their different strata are favorable to support the conservation of wildlife species [29]. As for the vertical stratification of the forest, it is classified into five levels: emerging layer, canopy, undergrowth, and soil layer [60, 61]. While the vertical stratification of cacao agrosystems is classified as high, medium, low, and floor [62].

Some of the trees found in these study sites are fruit trees such as *Citrus sinensis*, *Mangifera indica*, *Annona muricata*, and *Persea americana* [9, 17], while others are forestries such as *Tabebuia rosae* and *T. guayacan*. In addition, species such as *Cedrela odorata* and *Swietenia macrophylla*, which according to the IUCN category are considered vulnerable species. Shadow trees in cacao should be promoted as a way of conserving wildlife species [25], as it provides biological corridors for the movement and shelter of animals such as insects, birds, and mammals [9, 17]. Currently, diversification in agrosystems is a strategy that allows producers to compensate for economic losses caused by price fluctuations and low coffee and cacao production [63]. These types of strategies have focused on product diversification with basic crops, vegetables, fruit, timber, ornamental, and even animals [64]. Diversification can increase the overall production of the system, the rational incorporation of shade trees and the biodiversity associated with the system offers the possibility of improving the provision of ecosystem services without reducing coffee production [65].

In this research, the species *Erythrina americana* obtained an IVI value of 62.34, similar to other studies where the species had an IVI of 59.18 [33], 68.22 [66] and 78.5 [67]; the *Tabebuia rosea* species obtained an IVI of 36.25 similar to other studies where it had 35.30 [67] and 26.80 [33]; the *Maguifera indica* species

obtained an *IVI* of 25.32 comparable with other *IVI* of 18.00 [67], 31.70 [33] and 31.41 [66]; the species *Cedrela odorata* obtained an *IVI* of 23.86 similar to the *IVI* of 25.40 [33], 21.28 [66] and 26.50 [67]; the *Inga jinicuil* species obtained an *IVI* 26.39 very close to 26.84 [66] and 22.79 [33].

The presence of arboreal fauna at different levels of stratification is highly correlated with the structure of the diversity of trees. Therefore, they are crucial elements in the richness of biodiversity. Since currently in our study site, cacao agrosystems are the only thing that is available as a habitat for wildlife, and it is what most resembles a jungle due to its vertical stratification. House garden domestics and cover crops where you can find especially insects, spiders, and some mammals such as anteaters, wild boars, tapirs, and jaguars, where also a large amount of litter falls to the ground and is rapidly degraded by termites, worms, and fungi. Ornamental shade and fruit trees where we can find snakes and some birds. Managed foliage and nitrogen-fixing legumes birds (toucan), mammals (monkeys), reptiles, and amphibians. Emergent production palms and trees birds such as the scarlet macaw and other types of species.

Conclusion

Dasometric variables of the shade trees used in the cacao agrosystems were measured in the field and obtained the information necessary to determine the height of the canopy, crown diameter, and diameter of breast height to obtain the index of importance and forest value, these attributes are important as it could be taken as an input variable or parameter to predict available habitats through an ecological niche model and assess the quality of their habitat, including birds and arboreal primates. Cacao plantations due to shade trees can become key refuge areas for various species such as insects, amphibians, reptiles, birds, and mammals, especially when compared to more intensive agricultural practices. It is recommended to use LiDAR technology as a tool to measure parameters related to the vertical stratification of shade trees used in cacao agrosystems, in addition to quantifying the relationships between species and habitats, which is beneficial as a support for conservation, in the persistence of populations at local scales.

We appreciate the support of the SNI-CONACyT and the Higher Technological Institute of Comalcalco.

References

1. Cottontail V.M., Wellinghausen N., Kalko E.K.V. Habitat fragmentation and haemoparasites in the common fruit bat, *Artibeus jamaicensis* (Phyllostomidae) in a tropical lowland forest in Panamá // *Parasitology*. 2009. V. 136. No. 10. P. 1133–1145. doi: 10.1017/S0031182009990485
2. Raghubanshi A.S., Tripathi A. Effect of disturbance, habitat fragmentation and alien invasive plants on floral diversity in dry tropical forests of Vindhyan highland: a review // *Tropical Ecology*. 2009. V. 50. No. 1. P. 57–69.
3. McDermott M.E., Rodewald A.D., Matthews S.N. Managing tropical agroforestry for conservation of flocking migratory birds // *Agroforestry Systems*. 2015. V. 89. No. 3. P. 383–396. doi: 10.1007/s10457-014-9777-3
4. Bhagwat S.A., Willis K.J., Birks H.J.B., Whittaker R.J. Agroforestry: a refuge for tropical biodiversity? // *Trends in Ecology & Evolution*. 2008. V. 23. No. 5. P. 261–267. doi: 10.1016/j.tree.2008.01.005
5. Bisseleua D.H.B., Missouf A.D., Vidal S. Biodiversity conservation, ecosystem functioning, and economic incentives under cacao agroforestry intensification // *Conservation Biology*. 2009. V. 23. No. 5. P. 1176–1184. doi: 10.1111/j.1523-1739.2009.01220.x
6. Greenberg R. Biodiversity in the cacao agroecosystem: shade management and landscape considerations // *Migratory Bird Center Website*. 2014. Smithsonian Institution, Washington, DC. P. 1–12.
7. Abdulai I., Jassogne L., Graefe S., Asare R., Van Asten P., Läderach P., Vaast P. Characterization of cacao production, income diversification and shade tree management along a climate gradient in Ghana // *PLoS ONE*. 2018. V. 13. No. 4. Article No. e0195777. doi: 10.1371/journal.pone.0195777
8. Asase A., Ofori-Frimpong K., Ekpe P.K. Impact of cacao farming on vegetation in an agricultural landscape in Ghana // *African Journal of Ecology*. 2010. V. 48. No. 2. P. 338–346. doi: 10.1111/j.1365-2028.2009.01112.x
9. Asase A., Tetteh D.A. The role of complex agroforestry systems in the conservation of forest tree diversity and structure in southeastern Ghana // *Agroforestry Systems*. 2010. V. 79. No. 3. P. 355–368.
10. Richard A., Raebild A. Tree diversity and canopy cover in cacao systems in Ghana // *New Forests*. 2018. V. 47. No. 2. P. 287–302. doi: 10.1007/s11056-015-9515-3
11. Cattaneo J.H., Anderson A.B., Carvalho M.S. Floristic composition and topographic variation in a tidal floodplain forest in the Amazon Estuary // *Brazilian Journal of Botany*. 2002. V. 25. P. 419–430.
12. Sambuichi R.H., Vidal D.B., Piasentin F.B., Jardim J.G., Viana T.G., Menezes A.A., Baligar V.C. Cabruca agroforests in southern Bahia, Brazil: tree component, management practices and tree species conservation // *Biodiversity and Conservation*. 2012. V. 21. No. 4. P. 1055–1077.

13. Cárdenas-Torres M.A. Estudio comparativo de la composición florística, estructura y diversidad de fustales en dos ecosistemas del campo de producción 50k CPO-09, Llanos del Orinoco Colombiano // Colombia Forestal. 2014. V. 17. No. 2. P. 203–229 (in Spanish). doi: 10.14483/udistrital.jour.colomb.for.2014.2.a06
14. Ordoñez C.M., Rangel-Ch J.O. Composición florística y aspectos de la estructura de la vegetación en sistemas agroforestales con cacao (*Theobroma cacao* L. – Malvaceae) en el departamento del Huila, Colombia // Revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales. 2020. V. 44. No. 173. P. 1033–1046 (in Spanish). doi: 10.18257/raccefyn.1183
15. Suárez Salazar J.C., Melgarejo L.M., Casanoves F., Di Rienzo J.A., DaMatta F.M., Armas C. Photosynthesis limitations in cacao leaves under different agroforestry systems in the Colombian Amazon // PloS ONE. 2018. V. 13. No. 11. Article No. e0206149. doi: 10.1371/journal.pone.0206149
16. Somarriba E., Orozco Aguilar L. Árboles maderables en fincas de cacao orgánico del Alto Beni, Bolivia // Agroforestería en las Américas. 2005. No. 43–44. P. 46–53 (in Spanish).
17. Mbolo M.M.A., Zekeng J.C., Mala W.A., Fobane J.L., Chimi C.D., Ngavounsia T., Nyako C.M., Menyene L.F.E., Tamanjong Y.V. The role of cacao agroforestry systems in conserving forest tree diversity in the Central Region of Cameroon // Agroforestry Systems. 2016. V. 90. No. 4. P. 577–590.
18. Sonwa D.J., Weise S.F., Nkongmeneck B.A., Tchataat M., Janssens M.J. Structure and composition of cacao agroforests in the humid forest zone of Southern Cameroon // Agroforestry systems. 2017. V. 91. No. 3. P. 451–470.
19. Vaughan C., Ramírez O., Herrera G., Guries R. Spatial ecology and conservation of two sloth species in a cacao landscape in Limón, Costa Rica // Biodiversity and Conservation. 2007. V. 16. No. 8. P. 2293–2310.
20. Oke D.O., Odebiyi K.A. Traditional cacao-based agroforestry and forest species conservation in Ondo State, Nigeria // Agriculture, Ecosystems & Environment. 2007. V. 122. No. 3. P. 305–311. doi: 10.1016/j.agee.2007.01.022
21. Markum M., Soesilaningih E.A., Suprayogo D., Hairiah K. Plant species diversity in relation to carbon stocks at Jangkok watershed, Lombok Island // AGRIVITA. Journal of Agricultural Science. 2014. V. 35. No. 3. P. 207–217. doi: 10.17503/agrivita.v35i3.315
22. Tolangara A., Ahmad H., Liline S. The composition and important value index of trees for wildlife feed in Bacan Island, South Halmahera // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 2019. V. 276. No. 1. Article No. 012037. doi: 10.1088/1755-1315/276/1/012037
23. Jadán O., Torres B., Selesi D., Peña D., Rosales C., Günter S. Diversidad florística y estructura en cacaotales tradicionales y bosque natural (Sumaco, Ecuador) // Colombia Forestal. 2016. V. 19. No. 2. P. 5–18 (in Spanish). doi: 10.14483/udistrital.jour.colomb.for.2016.2.a01
24. Vebrova H., Lojka B., Husband T.P., Zans M.E.C., Van Damme P., Rollo A., Kalousova M. Tree diversity in cacao agroforests in San Alejandro, Peruvian Amazon // Agroforestry Systems. 2014. V. 88. No. 6. P. 1101–1115.
25. Cicuzza D., Kessler M., Clough Y., Pitopang R., Leitner D., Tjitrosoedirdjo S.S. Conservation value of cacao agroforestry systems for terrestrial herbaceous species in central Sulawesi, Indonesia // Biotropica. 2011. V. 43. No. 6. P. 755–762. doi: 10.1111/j.1744-7429.2010.00741.x
26. Guiracocha G., Harvey C.A., Somarriba E., Krauss U., Carrillo E. Conservación de la biodiversidad en sistemas agroforestales con cacao y banano en Talamanca, Costa Rica // Agroforestería en las Américas. 2001. V. 8. No. 30. P. 7–11 (in Spanish).
27. Suatunce P., Somarriba E., Harvey C., Finegan B. Composición florística y estructura de bosques y cacaotales en los territorios indígenas de Talamanca, Costa Rica // Agroforestería en las Américas. 2003. V. 10. P. 37–38 (in Spanish).
28. Gutiérrez F.S., Pérez-Flores J., Olan J.J.O., Sánchez A.S., Ruiz-Rosado O. Árboles maderables en el sistema agroforestal de cacao en Cárdenas, Tabasco, México // Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas. 2017. V. 14. P. 2711–2723 (in Spanish).
29. Salgado-Mora M.G., Ibarra-Núñez G., Macías-Sámamo J. E., López-Báez O. Diversidad arbórea en cacaotales del Soconusco, Chiapas, México // Interciencia. 2007. V. 32. No. 11. P. 763–768 (in Spanish).
30. Bolfe É.L., Batistella M. Análise florística e estrutural de sistemas silviagrícolas em Tomé-Açu, Pará // Pesquisa Agropecuária Brasileira. 2012. V. 46. No. 10. P. 1139–1147 (in Portuguese).
31. Siebert S.F. From shade-to sun-grown perennial crops in Sulawesi, Indonesia: implications for biodiversity conservation and soil fertility // Biodiversity & Conservation. 2002. V. 11. No. 11. P. 1889–1902.
32. Sánchez-Díaz B., Mata-Zayas E., Gama L., Rullan-Silva C., Vidal-García F., Rincón-Ramírez J. Use of different spectral vegetation indices to determine the presence of mantled howler monkeys (*Alouatta palliata* G.) on cacao agrosystems (*Theobroma cacao* L.) // Applied Ecology and Environmental Research. 2019. V. 17. No. 1. P. 1279–1297. doi: 10.15666/aeer/1701_12791297
33. Sánchez-Gutiérrez F., Pérez-Flores J., Obrador Olan J.J., Sol Sánchez Á., Ruiz-Rosado O. Estructura arbórea del sistema agroforestal cacao en Cárdenas, Tabasco, México // Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas. 2016. No. 14. P. 2695–2709 (in Spanish). doi: 10.29312/remexca.v0i14.439
34. Valenzuela-Córdova B., Mata-Zayas E.E., Pacheco-Figueroa C.J., Chávez-Gordillo E.J., Díaz-López H.M., Gama L., Valdez-Leal J.D.D. Potencial ecoturístico del agrosistema cacao (*Theobroma cacao* L.) con monos saraguatos (*Alouatta palliata* Gray) en la Chontalpa, Tabasco // Agroproductividad. 2015. V. 8. No. 5. P. 3–10 (in Spanish).

35. Muñoz D., Estrada A., Naranjo E., Ochoa S. Foraging ecology of howler monkeys in a cacao (*Theobroma cacao*) plantation in Comalcalco, Mexico // *American Journal of Primatology*. 2006. V. 68. No. 2. P. 127–142. doi: 10.1002/ajp.20211
36. Rognitz M., Chacón M., Porro R. Guia para Determinação de Carbono em Pequenas Propriedades Rurais. Centro Mundial Agroflorestal (ICRAF) Consórcio Iniciativa Amazônica (IA). Belém, Brasil, 2009. 79 p. (in Portuguese).
37. Valenzuela C.B. Evaluación del hábitat disponible para monos saraguatos (*Alouatta palliata mexicana*) en el agrosistema de cacao en el municipio de Comalcalco, Tabasco, México. Universidad Juárez Autónoma de Tabasco, 2018 (in Spanish).
38. Vidal-García F., Serio-Silva J.C. Potential distribution of Mexican primates: modeling the ecological niche with the maximum entropy algorithm // *Primates*. 2011. V. 52. No. 3. P. 261–270.
39. Scheelje B.J.M. Índice de la legislación sobre el aprovechamiento del recurso maderable en sistemas silvopastoriles de Costa Rica. Turrialba, Costa Rica, 2009. 157 p. (in Spanish).
40. Curtis J.T., McIntosh R.P. An upland forest continuum in the prairie forest border region of Wisconsin // *Ecology*. 1951. V. 32. No. 3. P. 476–496. doi: 10.2307/1931725
41. Justavino F.C., Hernández J.I.V., Alcalá V.M.C., Cossio F.V.G., Santos A.T., Rivera J.R.A. Estructura forestal de un bosque de mangles en el noreste del estado de Tabasco, México // *Revista Mexicana de Ciencias Forestales*. 2020. V. 26. No. 90. P. 73–102 (in Spanish).
42. Bisseleua H.B.D., Fotio D., Missouf A.D., Vidal S. Shade tree diversity, cacao pest damage, yield compensating inputs and farmers' net returns in West Africa // *PLoS ONE*. 2013. V. 8. No. 3. Article No. e56115. doi: 10.1371/journal.pone.0056115
43. Bos R., Windono T., Woerdenbag H.J., Boersma Y.L., Koulman A., Kayser O. HPLC photodiode array detection analysis of curcuminoids in Curcuma species indigenous to Indonesia // *Phytochemical Analysis: An International Journal of Plant Chemical and Biochemical Techniques*. 2007. V. 18. No. 2. P. 118–122. doi: 10.1002/pca.959
44. Philpott S.M., Bichier P., Rice R.A., Greenberg R. Biodiversity conservation, yield, and alternative products in coffee agroecosystems in Sumatra, Indonesia // *Biodiversity and Conservation*. 2008. V. 17. No. 8. P. 1805–1820.
45. Ariyanti N.S., Bos M.M., Kartawinata K., Tjitrosoedirdjo S.S., Guhardja E., Gradstein S.R. Bryophytes on tree trunks in natural forests, selectively logged forests and cacao agroforests in Central Sulawesi, Indonesia // *Biological Conservation*. 2008. V. 141. No. 10. P. 2516–2527. doi: 10.1016/j.biocon.2008.07.012
46. Edy N., Zakaria E.K., Lakani I. Forest conversion into cacao agroforestry and cacao plantation change the diversity of arbuscular mycorrhizal fungi // *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2019. V. 270. No. 1. Article No. 012015. doi: 10.1088/1755-1315/270/1/012015
47. Moorhead L.C., Philpott S.M., Bichier P. Epiphyte biodiversity in the coffee agricultural matrix: canopy stratification and distance from forest fragments // *Conservation Biology*. 2010. V. 24. No. 3. P. 737–746. doi: 10.1111/j.1523-1739.2009.01430.x
48. Valencia V., García-Barrios L., West P., Sterling E.J., Naeem S. The role of coffee agroforestry in the conservation of tree diversity and community composition of native forests in a biosphere reserve // *Agriculture, Ecosystems & Environment*. 2014. V. 189. P. 154–163. doi: 10.1016/j.agee.2014.03.024
49. Dawoe E., Asante W., Acheampong E., Bosu P. Shade tree diversity and aboveground carbon stocks in Theobroma cacao agroforestry systems: implications for REDD+ implementation in a West African cacao landscape // *Carbon Balance and Management*. 2016. V. 11. No. 1. Article No. 17. doi: 10.1186/s13021-016-0061-x
50. Lozada T., De Koning G.H.J., Marché R., Klein A.M., Tschardt T. Tree recovery and seed dispersal by birds: comparing forest, agroforestry and abandoned agroforestry in coastal Ecuador // *Perspectives in Plant Ecology, Evolution and Systematics*. 2007. V. 8. No. 3. P. 131–140. doi: 10.1016/j.ppees.2006.10.001
51. Somarriba E., Cerda R., Orozco L., Cifuentes M., Dávila H., Espin T., Astorga C. Carbon stocks and cacao yields in agroforestry systems of Central America // *Agriculture, Ecosystems & Environment*. 2013. V. 173. P. 46–57. doi: 10.1016/j.agee.2013.04.013
52. Reitsma R., Parrish J.D., McLarney W. The role of cacao plantations in maintaining forest avian diversity in southeastern Costa Rica // *Agroforestry Systems*. 2001. V. 53. No. 2. P. 185–193.
53. Cerda R., Deheuvels O., Calvache D., Niehaus L., Saenz Y., Kent J., Somarriba E. Contribution of cacao agroforestry systems to family income and domestic consumption: looking toward intensification // *Agroforestry Systems*. 2014. V. 88. No. 6. P. 957–981.
54. Zárate D.A., Andresen E., Estrada A., Serio-Silva J.C. Black howler monkey (*Alouatta pigra*) activity, foraging and seed dispersal patterns in shaded cacao plantations versus rainforest in southern Mexico // *American Journal of Primatology*. 2014. V. 76. No. 9. P. 890–899. doi: 10.1002/ajp.22276
55. Macip Ríos R., Macip R.F. Pago por servicios ambientales (ecosistémicos) en México Una alternativa para la conservación de la biodiversidad y el desarrollo? // *Biocyt Biología, Ciencia y Tecnología*. 2013. V. 6. P. 375–387 (in Spanish).
56. Idol T., Haggard J., Cox L. Ecosystem services from smallholder forestry and agroforestry in the tropics // *Integrating agriculture, conservation and ecotourism: examples from the field*. Springer, Dordrecht. 2011. P. 209–270.

57. Talora D.C., Morellato P.C. Fenología de espécies arbóreas em floresta de planície litorânea do sudeste do Brasil // *Brazilian Journal of Botany*. 2000. P. 13–26 (in Portuguese). doi: 10.1590/S0100-84042000000100002
58. Vilchez B., Rocha O. Fenología y biología reproductiva del nazareno (*Peltogyne purpurea* Pittier) en un bosque intervenido de la Península de Osa, Costa Rica // *América Central. Revista Forestal Mesoamericana Kurú*. 2004. V. 1. No. 1. P. 47–60 (in Spanish).
59. Llambí L.D. Estructura, diversidad y dinámica de la vegetación en el ecotono bosque-páramo: revisión de la evidencia en la Cordillera de Mérida // *Acta Bio-lógica Colombiana*. 2015. V. 20. No. 3. P. 5–19 (in Spanish). doi: 10.15446/abc.v20n3.46721
60. Minton S. Using movement to teach academics: An outline for success // *Journal of Physical Education, Recreation & Dance*. 2003. V. 74. No. 2. P. 36–40. doi: 10.1080/07303084.2003.10608377
61. Pelt R.V., Franklin J.F. Influence of canopy structure on the understory environment in tall, old-growth, conifer forests // *Canadian Journal of Forest Research*. 2000. V. 30. No. 8. P. 1231–1245. doi: 10.1139/x00-050
62. Somarriba E., Dominguez L., Harvey C. Cómo evaluar y mejorar el dosel de sombra en cacaotales // *Agroforestería en las Américas*. 2004. V. 41. No. 42. P. 120–128 (in Spanish).
63. Allinne C., Savary S., Avelino J. Delicate balance between pest and disease injuries, yield performance, and other ecosystem services in the complex coffee-based systems of Costa Rica // *Agriculture, Ecosystems & Environment*. 2016. V. 222. P. 1–12. doi: 10.1016/j.agee.2016.02.001
64. Meneses F.H., Vargas A.L.L., Portilla E.P., Solano V.M.C., Cárdenas S.D. Diversificación productiva café-plantas ornamentales en La Sidra, Atzacan, Veracruz // *Revista de Geografía Agrícola*. 2012. V. 48. No. 49. P. 39–50 (in Spanish).
65. Rodríguez P.A., Delgado J.R.M. La diversificación en sistemas agroforestales cafeteros del Tolima: una respuesta a la crisis // *Revista Agroforestería Neotropical*. 2014. V. 4. P. 26–38 (in Spanish).
66. Chablé-Pascual R., Palma-López D.J., Vázquez-Navarrete C.J., Ruiz-Rosado O., Mariaca-Méndez R., Ascencio-Rivera J.M. Estructura, diversidad y uso de las especies en huertos familiares de la Chontalpa, Tabasco, México // *Ecosistemas y Recursos Agropecuarios*. 2015. V. 2. No. 4. P. 23–39 (in Spanish).
67. Salvador-Morales P., Cámara-Cabrales L.D.C., Martínez-Sánchez J.L., Sánchez-Hernández R., Valdés-Velarde E. Diversidad, estructura y carbono de la vegetación arbórea en sistemas agroforestales de cacao // *Madera y bosques*. 2019. V. 25. No. 1 (in Spanish). doi: 10.21829/myb.2019.2511638
68. Cailliez F. Estimación del volumen forestal y predicción del rendimiento // V. 1. Estimación del volumen. Roma: Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación, 1980. 92 p. (in Spanish).

**Мониторинг атмосферного воздуха в районе предприятий
по утилизации опасных промышленных отходов**

© 2023. Т. Я. Ашихмина^{1,2}, д. т. н., профессор, г. н. с., зав. лабораторией,
Г. Я. Кантор^{1,2}, к. т. н., н. с., А. С. Тимонов^{1,2}, инженер,
Е. А. Домнина^{1,2}, к. б. н., с. н. с., Е. В. Дабах^{1,2}, к. б. н., с. н. с.,
Н. В. Сырчина¹, к. х. н., с. н. с., Л. В. Кондакова^{1,2}, д. б. н., профессор,
Т. И. Кутявина¹, к. б. н., с. н. с., С. Г. Скугорева², к. б. н., н. с.,
С. Ю. Огородникова², к. б. н., с. н. с., В. В. Рутман¹, м. н. с.,
Д. А. Кузнецов¹, аспирант,

¹Вятский государственный университет,
610000, Россия, г. Киров, ул. Московская, д. 36,

²Институт биологии Коми научного центра
Уральского отделения Российской академии наук,
167982, Россия, г. Сыктывкар, ул. Коммунистическая, д. 28,
e-mail: ecolab2@gmail.com

По материалам инженерно-экологических изысканий на проектирование производственно-технического комплекса (ПТК) «Марадыковский» по обработке, утилизации и обезвреживанию отходов I и II классов опасности сделан анализ расчётных выбросов загрязняющих веществ (ЗВ) в атмосферный воздух, в перечень которых входит 49 веществ различной химической природы и степени опасности. Проведено ранжирование ЗВ по величине критерия опасности этих веществ, учитывающего их токсичность и объёмы выброса в атмосферу. По полученным данным в программу экологического мониторинга атмосферного воздуха рекомендуется включить 22 приоритетных показателя. Кроме общепромышленных ЗВ (оксиды серы, азота, углерода, взвешенные вещества), к ним отнесены специфические ЗВ, характерные для предприятий по утилизации и обезвреживанию опасных промышленных отходов – это диоксины, бенз[а]пирен, оксиды кадмия, меди, никеля, свинца, алюминия, цинка, железа(III), ртути, а также аммиак, газообразные соединения фтора, хлороводород, циановодород. Предложено включить в программу мониторинга атмосферного воздуха мониторинг снежного покрова и показатели отклика биоты на техногенное атмосферное воздействие. Разработана карта-схема сети и предложен регламент проведения экологического мониторинга атмосферного воздуха.

Ключевые слова: мониторинг атмосферного воздуха, утилизация и обезвреживание промышленных отходов, приоритетные загрязняющие вещества.

**Atmospheric air monitoring in the area of enterprises
for the disposal of hazardous industrial waste**

© 2023. T. Ya. Ashikhmina^{1,2} ORCID: 0000-0003-4919-0047¹

G. Ya. Kantor^{1,2} ORCID: 0000-0002-6462-6702² A. S. Timonov^{1,2} ORCID: 0000-0001-8560-3051¹

E. A. Domnina^{1,2} ORCID: 0000-0002-5063-8606² E. V. Dabakh^{1,2} ORCID: 0000-0002-6088-4819¹

N. V. Syrchina¹ ORCID: 0000-0001-8049-6760¹ L. V. Kondakova^{1,2} ORCID: 0000-0002-2190-686X²

T. I. Kutyavina¹ ORCID: 0000-0001-7957-0636¹ S. G. Skugoreva² ORCID: 0000-0002-5902-5187²

S. Yu. Ogorodnikova² ORCID: 0000-0001-8865-4743² V. V. Rutman¹ ORCID: 0000-0002-9025-3487¹

D. A. Kuznetsov¹ ORCID: 0000-0002-5554-8378¹

¹Vyatka State University,

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

²Institute 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: ecolab2@gmail.com

Based on the materials of engineering and environmental surveys for the design of an industrial and technical complex (ITC) for the processing, disposal and neutralization of waste of I and II hazard classes "Mirny", an analysis of the calculated emissions of pollutants into the atmospheric air was made, the list of which includes 49 substances of various chemical nature and degree of danger. The pollutants were ranked according to the magnitude of the hazard criterion of these substances, taking into account their toxicity and volumes of emissions into the atmosphere. According to the data received, it is recommended to include 22 priority indicators in the program of environmental monitoring of atmospheric air. In addition to general industrial pollutants (oxides of sulfur, nitrogen, carbon, suspended solids), they include specific pollutants characteristic of enterprises for the disposal and disposal of hazardous industrial waste – these are dioxins, benzo[a]pyrene, oxides of cadmium, copper, nickel, lead, aluminum, zinc, iron(III), mercury, as well as ammonia, gaseous fluorine compounds, hydrogen chloride, hydrogen cyanide. It is proposed to include snow cover monitoring and indicators of biota response to technogenic atmospheric impact into the atmospheric air monitoring program. A map-scheme of the network has been developed and a regulation for conducting environmental monitoring of atmospheric air has been proposed.

Keywords: atmospheric air monitoring, utilization and neutralization of industrial waste, priority pollutants.

В России накоплено более 30 млрд т промышленных отходов, переработка и вторичное использование которых к 2020 г. составило 49,3% [1]. По экспертным данным из отходов I и II классов опасности в нашей стране на переработку попадает не более 1,5–2,0% [2].

Для решения проблемы утилизации и обезвреживания накопленных химических отходов I и II классов опасности 30 апреля 2019 г. Правительством РФ принято Постановление № 540 «Об осуществлении бюджетных инвестиций за счёт средств федерального бюджета в объекты капитального строительства в рамках федерального проекта «Инфраструктура для обращения с отходами I–II классов опасности». В Приложении к данному Постановлению определён перечень объектов капитального строительства – производственно-технических комплексов (ПТК) мощностью до 50 тыс. т/год, размещаемых на территориях объектов бывшего хранения и уничтожения химического оружия: в Кировской области – «Марадыковский», в Саратовской – «Горный», в Курганской – «Щучье», в Удмуртии – «Камбарка». Государственным заказчиком в отношении объектов капитального строительства определена Государственная корпорация по атомной энергии «Росатом», а заказчиком (застройщиком) – федеральное государственное унитарное предприятие «Федеральный экологический оператор» [3].

На данных предприятиях производственно-технологический процесс планируется обеспечить по трём направлениям: физико-химическая обработка, демеркуризация и высокотемпературное обезвреживание. В реализации каждого из них ставится задача «безопасно переработать отходы и вернуть их полезные компоненты в хозяйственный оборот» [2]. В 2019–2020 гг. на территориях планируе-

мого создания ПТК проведены инженерно-экологические изыскания, выполнены работы по оценке воздействия проектируемых объектов на окружающую среду (ОВОС).

На проектируемых ПТК планируется перерабатывать практически все виды промышленных отходов, отнесённых к I–II классам опасности (соединения ртути, свинца, кадмия, минеральные и синтетические масла, трансформаторы, конденсаторы, свинцовые аккумуляторы, отходы нефтепродуктов после процесса рафинирования, щёлочи и кислоты от аккумуляторов, отходы полимерной продукции и др.), всего порядка 350 видов отходов. В проектной документации спроектирована замкнутая схема оборота воды в технологическом процессе, без сброса сточных вод в системы очистных сооружений, поэтому следует ожидать, что основная техногенная нагрузка на природный комплекс в районе проектируемых ПТК и в дальнейшем эксплуатируемых Экотехнопарков будет приходиться на атмосферный воздух, почву, растительный и животный мир.

В связи с этим для обеспечения экологической безопасности территорий в районе данных Экотехнопарков необходимо разработать и внедрить на каждом из них систему комплексного экологического мониторинга. Система комплексного экологического мониторинга Экотехнопарка «Мирный» в Кировской области должна обеспечивать оценку состояния атмосферного воздуха, почвы, подземных и поверхностных вод, флоры и фауны на прилегающей к данному предприятию территории с целью выявления возможного техногенного воздействия.

Важной составной частью системы комплексного экологического мониторинга является мониторинг атмосферного воздуха, обеспечивающий оперативный контроль за деятельностью предприятия, оценку воздей-

ствия всех его источников на окружающую среду (ОС), прогноз и, самое главное, принятие превентивных управленческих решений по снижению техногенной нагрузки путём внедрения наилучших доступных технологий очистки выбросов от общепромышленных и специфических загрязнений [4], по сокращению и улавливанию выбросов CO₂, что крайне актуально для решения проблемы по обеспечению климатической устойчивости планеты и уменьшению углеродного вклада промышленного сектора [5, 6].

К специфическому загрязнению атмосферного воздуха при физико-химической переработке отходов относится, прежде всего, загрязнение соединениями гальванических шламов, содержащих тяжёлые металлы (ТМ), а при высокотемпературном обезвреживании – стойкими органическими соединениями, которые могут мигрировать и накапливаться в биосфере.

Основными критериями для выбора контролируемых веществ являются их свойства, количество и распространённость в ОС, стойкость (персистентность) вещества, способность к биоаккумуляции, миграции, межсредовому распределению, что проявляется в одновременном загрязнении нескольких сред.

Целью исследования является обоснование перечня загрязняющих веществ, которые могут быть включены в программу экологического мониторинга атмосферного воздуха, важной составляющей системы комплексного экологического мониторинга, обеспечивающей экологическую безопасность окружающей природной среды в районе создаваемого

Экотехнопарка «Мирный» по утилизации, обезвреживанию и переработке отходов I–II классов опасности.

Объекты и методы исследования

Объектом исследования являлся атмосферный воздух на территории создаваемого Экотехнопарка «Мирный». Анализ состояния атмосферного воздуха проводился по данным, полученным в ходе инженерно-экологических изысканий и по результатам исследований, выполненных в рамках ОВОС – части проектной документации по созданию ПТК «Марадыковский» по обработке, утилизации и обезвреживанию отходов I и II классов опасности [7]. Проведена статистическая обработка всего массива этих данных, сделан анализ приоритетных показателей, результаты которого представлены в таблицах и на диаграммах.

Территория ПТК находится в таёжно-лесной зоне, где преобладающими являются дерново-подзолистые почвы. Рельеф территории равнинный [7–9]. Характер зимней и летней розы ветров на данной территории существенно различается (рис. 1, 2) [7, 8].

Климат района – умеренно-континентальный, средняя температура – 3,1 °С. Среднее число дней в году со скоростью ветра, равной или превышающей 15 м/с, – 10,5. Средняя дата появления снежного покрова приходится на первую декаду октября, устойчивый снежный покров в среднем образуется в середине ноября. Разрушение снежного покрова происходит в первой декаде апреля. К началу сне-

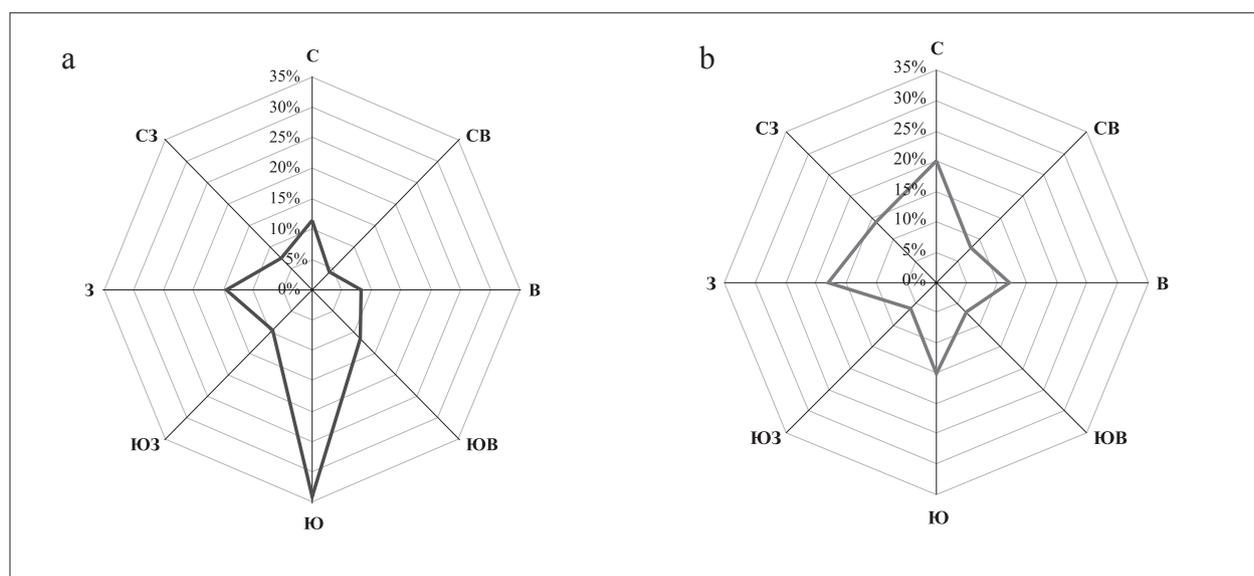


Рис. 1. Январская (а) и июльская (б) розы ветров по метеостанции Котельнич за период 1989–2020 гг.
 Fig. 1. January (a) and July (b) wind roses for the Kotelnich weather station for the period 1989–2020

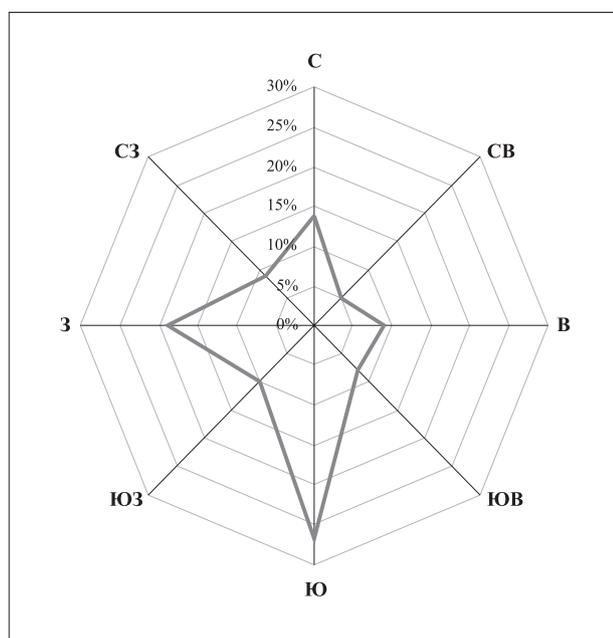


Рис. 2. Годовая роза ветров по метеостанции Котельнич за период 1989–2020 гг.
Fig. 2. Annual wind rose at the Kotelnich weather station for the period 1989–2020

готаяния средняя плотность снега – 0,27 г/см³. Значения фоновых концентраций загрязняющих веществ (ЗВ) в атмосферном воздухе пгт Мирный Оричевского района Кировской области по данным лаборатории мониторинга загрязнения ОС Кировского ЦГМС – филиала ФГБУ «Верхнее-Волжское УГМС» [7] приведены в таблице 1.

Результаты и обсуждение

Программа мониторинга атмосферного воздуха для Экотехнопарка «Мирный» по утилизации, переработке и обезвреживанию отходов I и II классов опасности включает перечень контролируемых веществ, сеть мониторинга, регламент отбора проб, мето-

дическое и информационное сопровождение. По материалам инженерно-экологических изысканий ПТК «Марадыковский» в результате деятельности Экотехнопарка «Мирный» в атмосферный воздух может поступить 49 веществ различной химической природы и степени опасности [7]. Из них на общепромышленные ЗВ III–IV классов опасности приходится около 90% от общей массы планируемых годовых выбросов. Наибольший вклад вносят оксиды азота (41,98%), серы (30,23%) и углерода (16,84%). Кроме того, в данную категорию ЗВ входят соли: хлориды калия и кальция; сульфат и гипохлорит натрия; оксиды металлов: железа, цинка, циркония, а также аммиак, сажа, взвешенные вещества.

В составе выбросов при эксплуатации данного Экотехнопарка к соединениям I класса опасности относятся оксиды кадмия, ртути, свинца, хрома, мышьяка и их неорганические соединения, а также органические соединения: бенз[а]пирен и диоксины. Представительство ЗВ II класса опасности в составе выбросов по видам и объёмам значительно больше. К ним относятся хлорид железа (III), оксиды никеля, алюминия, меди, фосфора, марганца и их неорганические соединения; кислоты (серная, азотная, соляная); газообразные соединения фтора, сероводород, циановодород, хлороводород, бромоводород. Из органических соединений к этой группе ЗВ относятся бензол, гексафторбензол, фенол и аминоэтанол. В целом суммарный выброс в атмосферный воздух ЗВ I и II классов опасности составит 1,891 т в год. Из них основная доля (97,5%) приходится на хлороводород – 1,58 т, соединения газообразного фтора составят в сумме 0,15 т, оксиды меди – 0,055 т, алюминия – 0,0245 т, никеля – 0,02 т, гексафторбензола – 0,015 т. На выбросы остальных ЗВ I и II классов опасности приходится лишь 2,5%. Однако к этой группе

Таблица 1 / Table 1

Значения фоновых концентраций загрязняющих веществ в атмосферном воздухе пгт Мирный Оричевского района Кировской области / The values of background concentrations of pollutants in the atmospheric air of the village Mirny, Orichevsky District, Kirov Region

Загрязняющее вещество Pollutant	Фоновая концентрация, мг/м ³ Background concentration, mg/m ³
NO ₂	0,055
CO	1,8
SO ₂	0,018
Взвешенные вещества / Suspended solids	0,199
NO	0,038
Бенз[а]пирен / Benz[a]pyrene	0,000015

*Примечание: представленные фоновые концентрации действительны на период с 2019 по 2023 гг.
 Note: the reported background concentrations are valid for the period 2019 to 2023.*

относятся высокоопасные ЗВ: диоксины, бенз[а]пирен, бромоводород, циановодород, фенолы, сероводород. Значения среднесуточной ПДК (ПДК_{сс}) у них различаются на много порядков, например, для хлороводорода оно равно 0,1 мг/м³, для бенз[а]пирена – 0,00001 мг/м³, а для диоксина – 0,00000005 мг/м³. В связи с этим для проведения экологического мониторинга атмосферного воздуха, оптимизации показателей необходимо провести их ранжирование с учётом валового выброса, предельно допустимых концентраций, классов опасности и, соответственно, токсичности ЗВ с целью формирования перечня приоритетных показателей, по которым контроль и мониторинг состояния атмосферного воздуха должны проводиться на постоянной основе, как в автоматическом режиме, так и передвижными лабораториями контроля по утверждённому регламенту.

Определение показателей контроля атмосферного воздуха проведено по результатам расчёта значений критерия опасности веществ в соответствии с рекомендациями [10]. Данный документ, выпущенный Госкомприроды СССР ещё в 1990 г., в настоящее время имеет рекомендательный характер, но его методологические аспекты во многом не утратили актуальности.

Критерии опасности веществ (КОВ) были рассчитаны для всех веществ из перечня проектных выбросов по формуле:

$$КОВ_i = (M_i / ПДК_{cc_i})^{A_i},$$

где M_i – суммарный выброс вещества, т/г, $ПДК_{cc_i}$ – среднесуточная предельно допустимая концентрация i -го вещества; A_i – постоянная, учитывающая класс опасности вещества [10].

Результаты ранжирования веществ по убыванию КОВ приведены в таблице 2 и отражены на рисунке 3.

На рисунке 3 наглядно видно, что входящие в перечень загрязняющие вещества по величине КОВ делятся на три группы: вещества с порядковыми номерами 1–9 по таблице 2 (КОВ = 36,19–852,21), 10–20 (КОВ = 0,62–5,13) и остальные ЗВ (КОВ ≤ 0,14). Приоритетному контролю подлежат ЗВ первых двух групп (всего 20 веществ). Кроме того, целесообразно дополнить приоритетный перечень двумя веществами I класса опасности – бенз[а]пирен и мышьяк (включая его неорганические соединения), которые вследствие малого объёма расчётного выброса не вошли в список приоритетного контроля.

Таким образом, из 49 ЗВ, которые могут поступать в атмосферный воздух в выбросах от деятельности Экотехнопарка «Мирный», к приоритетным следует отнести 22 показателя. Следовательно, наблюдения за их содержанием в природных средах и объектах должны быть включены не только в программу экологического мониторинга ОС в районе деятельности Экотехнопарка, но и обязательно введены в программу производственного контроля и мониторинга данного предприятия. Отслеживаться они должны на всех источниках загрязнения в производственной зоне, на промплощадке Экотехнопарка и на границе санитарно-защитной зоны (СЗЗ), как в непрерывном автоматическом режиме, так и передвижными лабораториями, причём с большей частотой на источниках выброса. С учётом возможных изменений в составе и количестве поступающих и перерабатываемых на данном предприятии отходов перечень показателей контроля и мониторинга должен корректироваться.

В определении регламента экологического мониторинга атмосферного воздуха за основу необходимо брать близость к источнику воздействия (по принципу: чем ближе, тем чаще проводить мониторинговые исследования), учитывать сезонность, направление ветра.

Промышленные выбросы и воздух рабочей зоны должны контролироваться в непрерывном режиме. Состояние атмосферного воздуха в приземном слое на границах СЗЗ Экотехнопарка «Мирный» должно контролироваться передвижной лабораторией с отбором проб воздуха с наветренной и подветренной сторон 1 раз в месяц. Отбор проб воздуха при определении приземной концентрации примеси в атмосфере необходимо проводить на высоте от 1,5 до 3,5 м от поверхности земли. Максимальные приземные концентрации ЗВ на территории в районе Экотехнопарка не должны превышать установленных нормативов. Перечень контролируемых показателей, методы исследований, виды и объёмы работ определяют с учётом требований ГОСТ 17.2.4.02-81, а также согласно нормативно-методическим и инструктивным документам Росгидромета и Росприроднадзора.

Кроме определения ЗВ в атмосферном воздухе на промплощадке, территории СЗЗ и в зоне влияния Экотехнопарка «Мирный» в программу экологического мониторинга необходимо включить показатели состояния снежного покрова, который является хорошим аккумулятором ЗВ, находящихся в атмосфере. Вследствие этого по токсичности

Таблица 2 / Table 2

Перечень показателей ЗВ в выбросах ПТК по убыванию значений критерия опасности
List of pollutant indicators in PTC emissions in descending order of hazard criterion values

№ No.	Загрязняющее вещество Pollutant	Класс опасности Hazard class	Выброс, т/год Ejection, t/year	ПДК _{сс} *, мг/м ³ Average daily MPC*, mg/m ³	КОВ** SHK**
1	Диоксид азота	III	34,09	0,04	852,21
2	Диоксид серы	III	24,55	0,05	490,96
3	Свинец и его соединения	I	9,86·10 ⁻³	0,0003	378,67
4	Оксид кадмия	I	7,63·10 ⁻³	0,0003	245,23
5	Оксид азота	III	5,54	0,06	92,32
6	Фтора газообразные соединения	II	1,51·10 ⁻¹	0,005	84,23
7	Оксид меди	II	5,51·10 ⁻²	0,002	74,45
8	Оксид никеля	II	2,00·10 ⁻²	0,001	48,99
9	Хлороводород	II	1,58	0,1	36,19
10	Диоксины	I	1,51·10 ⁻⁸	5,00·10 ⁻⁹	5,13
11	Взвешенные вещества	III	6,81·10 ⁻¹	0,15	4,54
12	Аммиак	IV	1,96·10 ⁻¹	0,04	4,17
13	Циановодород	II	2,97·10 ⁻²	0,01	4,11
14	Оксид углерода	IV	13,68	3	3,92
15	Оксид железа (III)	III	1,57·10 ⁻¹	0,04	3,92
16	Оксид алюминия	II	2,45·10 ⁻²	0,01	3,21
17	Ртуть	I	5,23·10 ⁻⁴	0,0003	2,57
18	Оксид цинка	III	7,43·10 ⁻²	0,05	1,47
19	Хром	I	9,40·10 ⁻³	0,01	0,9
20	Сажа	III	5,27·10 ⁻³	0,15	0,62
21	Бенз[а]пирен	I	3,16·10 ⁻⁶	0,00001	0,14
22	Гексафторбензол	II	1,46·10 ⁻²	0,1	8,16·10 ⁻²
23	Бензол	II	9,34·10 ⁻³	0,1	4,59·10 ⁻²
24	Оксид фосфора (V)	II	4,54·10 ⁻⁴	0,005	4,42·10 ⁻²
25	Марганец и его соединения	II	6,50·10 ⁻⁵	0,001	2,86·10 ⁻²
26	2-Аминоэтанол	II	6,98·10 ⁻⁴	0,02	1,28·10 ⁻²
27	Азотная кислота	II	4,78·10 ⁻³	0,15	1,13·10 ⁻²
28	Цирконий и его соединения	III	6,50·10 ⁻⁵	0,01	6,50·10 ⁻³
29	Фенол	II	4,70·10 ⁻⁵	0,003	1,80·10 ⁻³
30	Мышьяк, неорганические соединения	I	6,50·10 ⁻⁵	0,003	1,48·10 ⁻³
31	Гидроксид кальция	III	1,38·10 ⁻⁶	0,01	1,38·10 ⁻⁴
32	Хлорид кальция	III	6,80·10 ⁻⁷	0,03	6,80·10 ⁻⁵
33	Серная кислота	II	2,73·10 ⁻⁵	0,1	2,33·10 ⁻⁵
34	Хлорид калия	IV	1,00·10 ⁻⁸	0,01	3,98·10 ⁻⁶
35	Бромоводород	II	6,10·10 ⁻⁶	0,1	3,32·10 ⁻⁶
36	Пыль неорганическая: SiO ₂ > 70%	III	9,52·10 ⁻⁸	0,06	1,59·10 ⁻⁶

Примечание: * – ориентировочно безопасный уровень воздействия; ** – критерий опасности веществ.
Note: * – estimated safe exposure level; ** – substance hazard criterion.

талой воды, по содержанию в ней различных химических соединений можно оценить состояние атмосферного воздуха на контролируемой территории. Пробы отбираются на всю глубину снежного покрова один раз

в год перед первым интенсивным снеготаянием (для данного региона это конец марта).

В программу экологического мониторинга рекомендуется включить и биоиндикационные показатели, характеризующие отклик

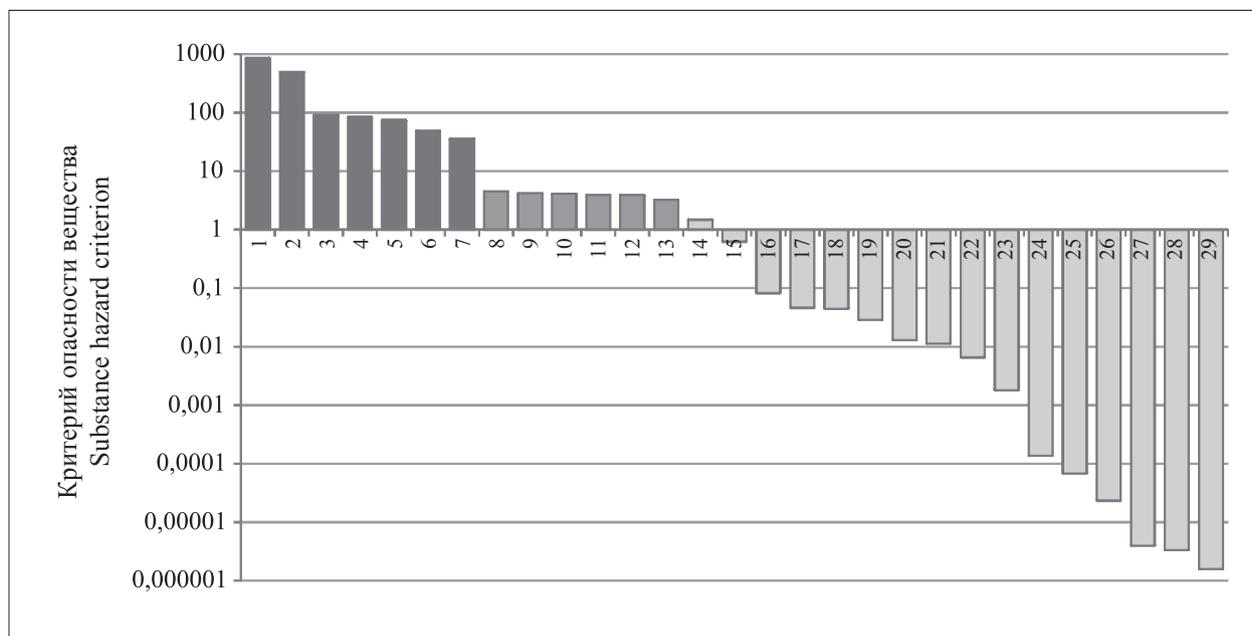


Рис. 3. Значения коэффициентов опасности ЗВ в составе выбросов в атмосферный воздух (числовые обозначения по оси абсцисс соответствуют их номерам в графе 1 таблицы 2)
Fig. 3. Values of hazard coefficients of pollutants as part of emissions into the atmospheric air (numbers on the abscissa axis correspond to their numbers in column 1 of Table 2)

биоты на атмосферное загрязнение. В этом плане хорошо себя зарекомендовали показатели, отражающие изменение фитоаккумуляции ТМ, общей серы, азота, фосфора лишайниками и мхами, состояние хвои (появление пятен, усыхание), а также степени проективного покрытия лишайниками сосны обыкновенной, одного из видов древесных растений, образующих наибольшие площади леса на территории в районе создаваемого Экотехнопарка [8, 14].

Карта-схема пунктов мониторинга атмосферного воздуха в районе создаваемого Экотехнопарка «Мирный» представлена на рисунке 4.

При проектировании сети экологического мониторинга атмосферного воздуха в районе Экотехнопарка «Мирный» учитываются все источники воздействия, роза ветров, ландшафтные особенности территории, типы почв, биоценозы, близость предприятия к населённым пунктам, дорогам, железнодорожным магистралям, сельскохозяйственным объектам, скотомогильникам. Целесообразно скоординировать участки мониторинга атмосферного воздуха с расположением участков мониторинга почв и снежного покрова.

Заключение

Анализ проектных данных по инженерно-экологическим изысканиям и оценке воздей-

ствия проектируемого ПТК «Марадыковский» позволил выявить по вкладу в общегодовой выброс и токсическому действию 22 приоритетных показателя контроля и мониторинга атмосферного воздуха, которые рекомендуется включить в программу производственного контроля и экологического мониторинга ОС в районе деятельности создаваемого Экотехнопарка «Мирный». К ним относятся как общепромышленные ЗВ (оксиды серы, азота, углерода, взвешенные вещества), так и специфические ЗВ, характерные для предприятия по утилизации и обезвреживанию опасных промышленных отходов – это диоксины, бенз[а]пирен, ртуть, аммиак, газообразные соединения фтора, хлороводород, циановодород, оксиды кадмия, меди, никеля, свинца, алюминия, цинка, железа (III).

Кроме того, в программу экологического мониторинга рекомендуется включить показатели состояния снежного покрова (как индикатора чистоты атмосферного воздуха), показатели, характеризующие фитоаккумуляцию тяжёлых металлов, общей серы, соединений азота и фосфора лишайниками и мхами, а также показатели, отражающие состояние хвои и степень проективного покрытия лишайниками сосны обыкновенной.

К основным научным направлениям исследований по оптимизации системы экологического мониторинга атмосферного воз-

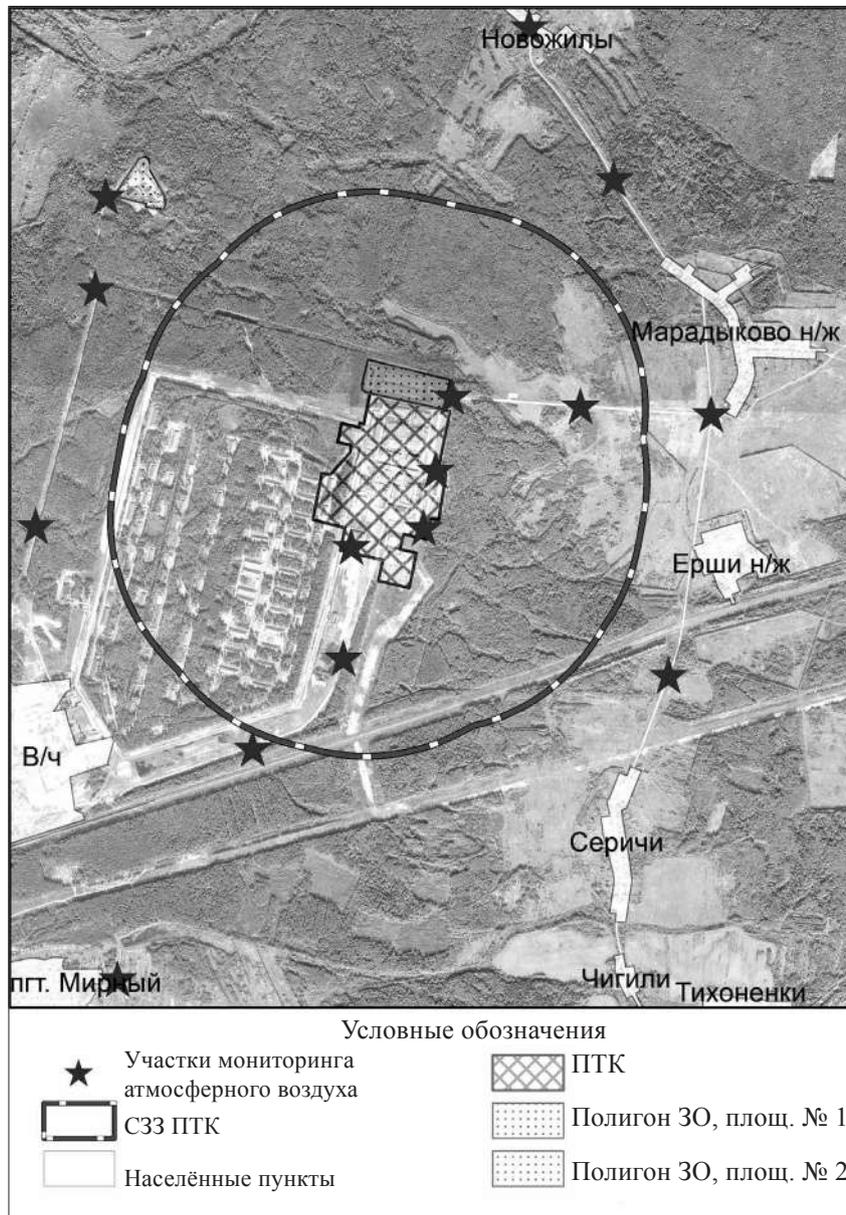


Рис. 4. Карта-схема участков мониторинга атмосферного воздуха в районе проектируемого ПТК и создаваемого Экотехнопарка «Мирный»
Fig. 4. Schematic map of atmospheric air monitoring points in the area of the Ecotechnopark “Mirny” being created

духа в районе производственно-технических комплексов по утилизации, обезвреживанию и переработке особо опасных промышленных отходов следует отнести изучение отклика природных объектов на специфическое токсическое действие поллютантов, а также выявление эффектов совместного действия ЗВ. Кроме того, при разработке системы мониторинга атмосферного воздуха в районе проектируемого ПТК и создаваемого Экотехнопарка необходимо учитывать вероятное присутствие в выбросах неизвестных или неучтённых при проектировании ЗВ.

Для установления фоновых показателей экологического мониторинга необходимо до начала функционирования ПТК провести комплексное обследование территории и определить фоновое содержание в атмосферном воздухе и других природных средах, как общепромышленных, так и специфических для ПТК загрязняющих веществ.

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.

References

Литература

1. Государственный доклад «О состоянии и об охране окружающей среды Российской Федерации в 2020 году». М.: Минприроды России; МГУ имени М.В. Ломоносова, 2021. 864 с.
2. Корольков М.В. Основы государственной политики Российской Федерации по созданию новой отрасли переработки промышленных отходов // Теоретическая и прикладная экология. 2020. № 4. С. 6–12.
3. Постановление Правительства РФ от 30 апреля 2019 г. № 540 «Об осуществлении бюджетных инвестиций за счет средств федерального бюджета в объекты капитального строительства в рамках федерального проекта «Инфраструктура для обращения с отходами I–II классов опасности» (с изменениями) 31 августа 2019 г., 28 июля 2020 г.».
4. Информационно-технический справочник по наилучшим доступным технологиям. ИТС 15-216. Утилизация и обезвреживание отходов (кроме обезвреживания термическим способом (сжигание отходов)). М.: Бюро НДТ, 2016. 198 с.
5. Гордеева Е.М., Пугач В.Н. Парижское соглашение и «климатическая нейтральность»: роль сектора «Землепользование» // Теоретическая и прикладная экология. 2021. № 3. С. 219–227.
6. Сырчина Н.В., Кантор Г.Я., Пугач В.Н., Ашихмина Т.Я. Вклад углекислого газа и воды в парниковый эффект // Теоретическая и прикладная экология. 2021. № 4. С. 218–223.
7. Проектная документация «Производственно-технический комплекс по обработке, утилизации и обезвреживанию отходов I и II классов опасности «Марадьковский». М.: Государственная корпорация по атомной энергии «Росатом», Акционерное общество «Государственный специализированный проектный институт», 2020. 1360 с.
8. Ашихмина Т.Я. Комплексный экологический мониторинг объекта уничтожения химического оружия. Киров: Вятка, 2002. 544 с.
9. Схема территориального планирования Оричевского муниципального района Кировской области. Схема зон возможного проявления чрезвычайных ситуаций природного и техногенного характера. Киров: Кировпроект, 2009 [Электронный ресурс] <https://orichi-rayon.ru/organy-vlasti/gradostroitel'naya-deyatelnost/shema-territorialnogo-planirovaniya-orichevskogo-municipalnogo-rajona-kirovskoj-oblasti> (Дата обращения: 07.02.2022).
10. Руководство по контролю источников загрязнения атмосферы ОНД-90. Госкомприроды СССР, Постановление № 8 от 30 октября 1990 г.
11. Домнина Е.А., Огородникова С.Ю., Пестов С.В., Ашихмина Т.Я. Методы лишеноиндикации в оценке загрязнения атмосферного воздуха соединениями фосфора // Теоретическая и прикладная экология. 2019. № 4. С. 37–44.

1. State report “On the state and protection of the environment of the Russian Federation in 2020”. Moskva: Ministry of Natural Resources of Russia; Moscow State University named after M.V. Lomonosov, 2021. 864 p. (in Russian).
2. Korolkov M.V., Mazhuga A.G. Fundamentals of the state policy of the Russian Federation on the creation of a new branch of industrial waste processing // Theoretical and Applied Ecology. 2020. No. 4. P. 6–12 (in Russian). doi: 10.25750/1995-4301-2020-4-006-012
3. Decree of the Government of the Russian Federation of April 30, 2019 No. 540 “On the implementation of budget investments at the expense of the federal budget in capital construction projects within the framework of the federal project “Infrastructure for the management of waste of I–II hazard classes” (as amended) August 31, 2019 July 28, 2020” (in Russian).
4. Information and technical guide to the best available technologies. ITS 15-216. Utilization and neutralization of waste (except for thermal neutralization (waste incineration)). Moskva: Bureau of NDT, 2016. 198 p. (in Russian).
5. Gordeeva E.M., Pugach V.N. The Paris Agreement and “Climate neutrality”: the role for “Agriculture, forestry and other land use” sector // Theoretical and Applied Ecology. 2021. No. 3. P. 219–227 (in Russian). doi: 10.25750/1995-4301-2021-3-219-227
6. Syrchina N.V., Kantor G.Ya., Pugach V.N., Ashikhmina T.Ya. Contribution of carbon dioxide and water to the greenhouse effect // Theoretical and Applied Ecology. 2021. No. 4. P. 218–223 (in Russian). doi: 10.25750/1995-4301-2021-4-218-223
7. Project documentation “Industrial and technical complex for processing, recycling and neutralization of waste of hazard classes I and II “Maradykovsky”. State Atomic Energy Corporation “Rosatom”, Joint Stock Company “State Specialized Design Institute”, 2020. 1360 p. (in Russian).
8. Ashikhmina T.Ya. Comprehensive environmental monitoring of a chemical weapons destruction facility. Kirov: Vyatka, 2002. 544 p. (in Russian).
9. Scheme of territorial planning of the Orichovsky municipal district of the Kirov region. Scheme of zones of possible manifestation of natural and man-made emergencies. Kirov: Kirovproekt, 2009 [Internet resource] <https://orichi-rayon.ru/organy-vlasti/gradostroitel'naya-deyatelnost/shema-territorialnogo-planirovaniya-orichevskogo-municipalnogo-rajona-kirovskoj-oblasti> (Accessed: 07.02.2022) (in Russian).
10. Guidelines for the control of atmospheric pollution sources OND-90. Goskomprirroda of the USSR, Decree No. 8 of October 30, 1990 (in Russian).
11. Domnina E.A., Ogorodnikova S.Yu., Pestov S.V., Ashikhmina T.Ya. Lichenoindication methods for assessing atmospheric air pollution by phosphorus compounds // Theoretical and Applied Ecology. 2019. No. 4. P. 37–44 (in Russian). doi: 10.25750/1995-4301-2019-4-037-044

Интегральная характеристика качества атмосферного воздуха городов Европы

© 2023. В. С. Тикуннов, д. г. н., профессор,
С. К. Белоусов, к. т. н., ведущий инженер,
Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова,
119991, Россия, г. Москва, ул. Колмогорова, д. 1,
e-mail: vstikunov@yandex.ru, web-town@mail.ru

В статье представлена методика оценки качества атмосферного воздуха городов Европы. Подходы к интегральной оценке качества атмосферного воздуха в России и в других странах имеют ряд существенных различий в выборе используемых показателей и в методике получения его интегральной характеристики. Используемый в России индекс загрязнения атмосферы (ИЗА) является кумулятивным и включает в себя опасные загрязнители с малыми абсолютными концентрациями, в то время как широко распространённый в странах Европы и США индекс качества атмосферного воздуха Air Quality Index (AQI), напротив, отражает качество атмосферного воздуха по самому крупному загрязнителю без учёта классов опасности веществ. Это обуславливает слабую совместимость оценок, проведённых в России, и таковых, сделанных в других странах. В исследовании произведён расчёт интегральных индексов AQI и ИЗА, а также осуществлено их сравнение для городов Европы. Проведена классификация городов Европы по загрязнению атмосферного воздуха, а также преимущественным загрязнителям. Выделено 5 классов городов, относительно однородных по уровню загрязнения воздуха и преимущественным загрязнителям. Полученные с использованием двух подходов к оцениванию результаты позволяют уменьшить недостатки каждого из индексов и дать более подробную характеристику качеству атмосферного воздуха городов.

Ключевые слова: интегральные индексы, качество атмосферного воздуха, индекс загрязнения атмосферы, многопараметрическая классификация концентраций загрязнителей.

Integral classification of air quality in European cities

© 2023. V. S. Tikunov ORCID: 0000-0002-1597-6909[†]
S. K. Belousov ORCID: 0000-0001-9481-5160[‡]
Lomonosov Moscow State University,
1, Kolmogorova St., Moscow, Russia, 119991,
e-mail: vstikunov@yandex.ru, web-town@mail.ru

The article presents a method of integral assessment of air quality in European cities. The approaches to the integrated assessment of air quality in Russia and other countries have a number of significant differences in the set of used indicators and in the methodology for obtaining its integral characteristics. The air pollution index (IZA) used in Russia is cumulative and includes hazardous pollutants with low absolute concentrations, while the Air Quality Index (AQI) widely used in Europe and the United States shows the quality of atmospheric air by the largest pollutant without considering the hazard classes of substances. This leads to weak compatibility of assessments made in Russia and those made in other countries. In the study, the Air Quality Index and the Index of Atmospheric Pollution were calculated, as well as their comparison was carried out for European cities. The results obtained using two approaches to the assessment make it possible to reduce shortcomings of indices and give a more detailed characterization of the air quality in cities. The research shows that multiparameter classification made by one of air quality indices perform is weak, but using both indices at the same time significantly improve results. It is possible to make a relevant cities air quality classification by the main pollutants using both AQI and IZA. Cities in air quality classes form clear-cut clusters that strongly correlate with current economical zoning in Europe.

Keywords: integral indices, air quality, air quality index, multiparameter pollutant classification.

Экологическое состояние территории – важнейшая составляющая качества жизни населения. Воздействие комплекса загрязняющих веществ на человека косвенно находит своё отражение в здоровье населения [1]. Качество атмосферного воздуха играет в этом важную роль. Существуют статистически значимые связи между количеством выбросов загрязняющих веществ в атмосферу и показателем заболеваемости детского населения региона заболеваниями дыхательных путей [2, 3].

В России мониторинг качества атмосферного воздуха осуществляет преимущественно Росгидромет, обладающий самой широкой в стране сетью постов экологического мониторинга. На основе получаемых данных, согласно утверждённым методическим документам (РД 52.04.667-2005), производится расчёт показателей качества атмосферного воздуха в регионе. К таковым относятся 2 единичных показателя (стандартный индекс – СИ, наибольшая повторяемость – НП) и один интегральный (индекс загрязнения атмосферы – ИЗА) [4].

Индекс загрязнения атмосферы является основополагающим для интегральной оценки качества атмосферного воздуха городов [5]. Он рассчитывается путём суммирования индексов для каждого загрязнителя, полученных в результате сравнения среднегодовых его концентраций со значением ПДК с учётом класса вредности вещества. Для стандартизации принято производить расчёт индекса загрязнения атмосферы по 5 загрязнителям (ИЗА₅).

В зависимости от значения ИЗА₅ территориальной единице даётся оценочная характеристика (в зависимости от значений СИ и НП она может экспертным образом корректироваться). Показатель ИЗА₅ характеризует, в первую очередь, длительное загрязнение атмосферы, поскольку основывается на осреднённых за год показателях.

В международной практике оценивания качества атмосферного воздуха широко применяется индекс качества воздуха (Air Quality Index – AQI), разработанный Агентством по охране окружающей среды США (EPA). Список показателей включает в себя концентрации диоксида азота (NO₂), диоксида серы (SO₂), монооксида углерода (CO), озона (O₃), взвешенных веществ размером менее 10 мкм (PM₁₀) и размером менее 2,5 мкм (PM_{2.5}).

Интегральный индекс AQI – это максимальное значение индекса по всем наблюдаемым загрязнителям из списка. AQI подлежит

ежедневному расчёту, и усреднение на длительный период производится уже по рассчитанному значению индекса, а не по исходным концентрациям. Как и в случае с ИЗА₅, существует оценочная шкала для качественной интерпретации значений индекса [6].

Интегральные индексы ИЗА₅ и AQI достаточно сильно различаются по методике расчёта для того, чтобы их можно было совместно использовать в исследованиях. Каждый из индексов имеет ряд недостатков. Например, ИЗА₅ не учитывает кратковременное очень сильное повышение концентраций загрязнителей, очень зависим от текущей правовой базы и набора загрязнителей, подлежащих мониторингу, на каждой конкретной станции [7]. В то же время AQI не учитывает опасные загрязнители, имеющие малые абсолютные концентрации, а также не является кумулятивным. Массивы данных по AQI недостаточно затрагивают Россию и страны СНГ, и, наоборот, ИЗА редко рассчитывается для зарубежных территорий.

Целью работы было сравнение и совместное применение индексов AQI и ИЗА₅ для уточнения оценки качества атмосферного воздуха городов. Города Европы для этого подходят наилучшим образом, поскольку европейская система мониторинга качества окружающей среды предоставляет достаточный объём данных как в виде концентраций загрязнителей (для расчёта ИЗА₅), так и в виде интегральных данных о качестве атмосферного воздуха (AQI).

Объекты и методы исследования

Данные по текущему значению AQI в городах Европы предоставляются различными государственными структурами, коммерческими и некоммерческими организациями, осуществляющими мониторинг качества атмосферного воздуха. Европейское агентство по окружающей среде (ЕЕА) составляет интерактивную карту European Air Quality Index [8], на которой отображаются текущие и архивные (до 48 ч) значения AQI дискретностью 1 ч для большого количества городов стран Европейского Союза. К сожалению, получить данные по AQI, охватывающие более значительный промежуток времени, не представляется возможным. Проект IQAir также с помощью интерактивной карты [9] предоставляет информацию по значениям AQI городов мира, в том числе Европы, по данным собственных станций и результатам моделирования. Дан-

ные доступны на карте за последние 7 дней, а также в виде таблиц за последний месяц с дискретностью 1 день. Усреднённые значения за год предоставляются только по $PM_{2.5}$. Некоммерческий проект World Air Quality Index (WAQI) предоставляет информацию о значениях AQI в реальном времени для более чем 2000 городов мира. Исходные данные для расчётов берутся из официальных источников национальных агентств по охране окружающей среды. Более того, проект предоставляет архивные данные с 2015 г. по настоящее время по всей величине базы данных [5]. Несмотря на то, что существенным недостатком данного ресурса является очень слабое покрытие данными по территории России (до 2020 г. в базе данных присутствовали только данные по г. Москва), именно данный ресурс позволяет получить наиболее полное покрытие территории Европы исходными данными.

Данные по ИЗА на регулярной основе рассчитываются и публикуются только для территории России в ежегодниках состояния загрязнения атмосферы в городах на территории России, выпускаемых Главной геофизической лабораторией им. Воейкова. В этих ежегодниках для большинства городов значение ИЗА приводится в качественной интерпретации согласно таблице 2. Значения $ИЗА_5$ для городов Европы возможно вычислить по формуле (1) по усреднённым годовым концентрациям основных загрязняющих веществ, предоставляемым ЕЕА с учётом нормативных значений ПДК по ГН 2.1.6.3492-17.

$$ИЗА_5 = \sum_{i=1}^5 \left(\frac{q_{cp.i}}{ПДК_{c.c.i}} \right)^{c_i}, \quad (1)$$

где $q_{cp.i}$ – среднегодовая концентрация i -го загрязняющего вещества, $ПДК_{c.c.i}$ – его среднесуточная предельно допустимая концентрация, c_i – безразмерный коэффициент, позволяющий привести степень вредности i -го загрязняющего вещества к степени вредности диоксида серы.

Для проведения исследования выбран 2018 г. Среднегодовые значения AQI по каждому из 6 загрязнителей (CO , NO_2 , SO_2 , O_3 , $PM_{2.5}$, PM_{10}) определены согласно данным WAQI [10] для 196 городов Европы (включая Москву), а расчёты $ИЗА_5$ произведены по данным ЕЕА [8] для 84 городов Европейского союза по 8 загрязнителям (бенз[а]пирен, CO , NO , NO_2 , SO_2 , O_3 , $PM_{2.5}$, PM_{10}). Значения AQI и ИЗА рассматриваются как по каждому загрязнителю отдельно, так и по интегральному показателю качества атмосферного воздуха. Для 65 городов

Европы одновременно присутствуют значения AQI и ИЗА.

В исследовании применена методика многопараметрической типологии городов [11] по приоритетным загрязнителям по AQI, ИЗА, а также при их совместном использовании. Основным критерием построения модели является гомогенность территориальных единиц, объединяемых в гетерогенные типы. Этот метод предполагает нормировку исходных значений показателя по дисперсиям и математическим ожиданиям.

$$\bar{x}_{ij} = \frac{x_{ij} - \bar{x}_j}{\sigma_j}, \quad i = 1, 2, 3, \dots, n; \quad j = 1, 2, 3, \dots, m \quad (2)$$

$$\bar{x}_j = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_{ij}; \quad \sigma_j = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_{ij} - \bar{x}_j)^2}. \quad (3)$$

Целью данной нормировки является приведение каждого показателя к стандартному виду (в результате математическое ожидание любого показателя становится равным нулю, а дисперсия – единице).

Затем, с учётом результатов нормировки, была проведена процедура многовариантной типологии, которая реализовывалась на основе критерия минимизации внутригрупповых различий городов при выделении разного числа групп. В качестве меры сходства использовались евклидовы расстояния:

$$d_{ik} = \sqrt{\sum_{j=1}^m (\bar{x}_{ij} - \bar{x}_{kj})^2}, \quad i = 1, 2, 3, \dots, n; \quad j = 1, 2, 3, \dots, m. \quad (4)$$

Их вычислению предшествовал этап обработки массива данных по методу главных компонент.

Собственно алгоритм типологии таков. Из полученных значений d_{ik} выбирается наибольшее расстояние, а две территориальные единицы, которые оно связывает, становятся ядрами однородных кластеров. Кластеры формируются распределением остальных территорий между двумя ядрами по минимальности евклидовых расстояний. В случае выделения большего числа кластеров, для определения третьего ядра и всех последующих, каждую из всех оставшихся территориальных единиц подставляют в виде ядра, а остальные распределяются между тремя ядрами по минимальности d_{ik} и находится вариант с наименьшими внутригрупповыми различиями. Процедура определения 4-го ядра и формирование типологии с 4-мя типами аналогична вышеописанной и т. д. до максимально возможной величины, задаваемой заранее – t_{max} .

Получаемый ряд группировок можно анализировать на основе абсолютного и относительного коэффициентов неоднородности и с их помощью выбирать оптимальное количество кластеров:

$$A_k = \frac{100 \left\{ \sum_{k=1}^K \sum_{j=1}^n \sum_{i=1}^n \left[\sum_{p=1}^P (x_{ip} - x_{jp})^2 \right]^{1/2} I_{ik} I_{jk} \right\}}{\sum_{i=1}^{t_{\max}} \left[\sum_{p=1}^P (x_{ip} - x_{jp})^2 \right]^{1/2}}, \quad (5)$$

$$k = t_{\min}, t_{\min} + 1, \dots, t_{\max}$$

$$O_k = \frac{100 \left\{ \sum_{k=1}^K \sum_{j=1}^n \sum_{i=1}^n \left[\sum_{p=1}^P (x_{ip} - x_{jp})^2 \right]^{1/2} I_{ik} I_{jk} \right\}}{\sum_{i=1}^{t_{\max}} \sum_{j=1}^n \sum_{i=1}^n \left[\sum_{p=1}^P (x_{ip} - x_{jp})^2 \right]^{1/2} I_{ik} I_{jk}}, \quad (6)$$

$$k = t_{\min}, t_{\min} + 1, \dots, t_{\max} - 1.$$

Резкое возрастание значений A_k или O_k при уменьшении числа выделяемых кластеров свидетельствует о повышении неоднородности внутри выделенных кластеров, и, напротив, плавное возрастание коэффициентов – признак равномерного её увеличения. Порог, за которым следует резкое повышение неоднородности, оптимально принимать за окончательное число кластеров. В качестве окончательного варианта из всего спектра выбираются «наилучшие со статистической точки зрения» варианты типологии [11]. В данном случае чаще всего это были варианты с пятью таксонами.

Результаты и обсуждение

В результате расчётов значений индексов AQI и ИЗА получена матрица размерностью 53×14 , содержащая в себе значения как AQI, так и ИЗА по загрязнителям для городов Европы, из рассмотрения исключены города, в которых наблюдались пробелы по $PM_{2.5}$ – ключевому показателю для расчёта индекса AQI (из 196 городов, для которых был рассчитан индекс AQI, только для 60 максимальное значение было достигнуто не по AQI для $PM_{2.5}$, а в свою очередь из этих 60 только у 9 не было пробелов по $PM_{2.5}$). Анализ единой матрицы показателей качества воздуха подтвердил значительное различие в оценке качества атмосферного воздуха по AQI и ИЗА₅ (рис. 1).

Коэффициент парной корреляции рангов городов по ИЗА₅ и AQI составляет 32,1%, а среднее значение взаимного отклонения рангов составляет 14,2.

По AQI 57% городов можно охарактеризовать низким уровнем воздействия загрязнителей на здоровье (0–50), причём 3,5% городов укладываются в половину необходимого для этого значения индекса AQI (0–25). 43% городов же относятся к среднему уровню воздействия (50–100), из них 32% находятся в первой половине указанного интервала (50–75), а лишь 11% – во второй (75–100). Таким образом, ни один из рассматриваемых городов не характеризуется нездоровым для человека. Значительную дифференциацию значений AQI по загрязнителям можно наблюдать, в основном в отношении PM_{10} и $PM_{2.5}$ (среднее квадратическое отклонение составляет 6,6 и 17,1 соответственно). Значения AQI по остальным загрязнителям более однородны (среднее квадратическое отклонение менее 5).

В результате расчётов произведена многопараметрическая классификация городов по общему уровню AQI и приоритетным загрязнителям. Оптимальное количество классов – 5, поскольку при увеличении их количества до 6 происходит резкое повышение неоднородности внутри классов. На рисунке 1 показано распределение городов по выделенным классам.

Класс № 1 – немногочисленный и включает в себя 8 городов (преимущественно на северных территориях, а также в Испании, Франции и Швейцарии). Эти города характеризуются низкими значениями AQI как по отдельным загрязнителям, так и в общем. Характерной чертой городов, относящихся к первому классу, являются самые низкие значения AQI PM_{10} и $PM_{2.5}$. Города из класса № 1 являются наиболее безопасными для проживания человека с точки зрения качества атмосферного воздуха.

Класс № 2 состоит из одного города – Тузлы (Босния и Герцеговина), отличающегося высоким значением AQI $PM_{2.5}$ и AQI SO_2 . Причём именно высокая концентрация по диоксиду серы, совершенно нехарактерная для городов Европы, даёт основания выделить этот город в отдельный класс. Экологическая ситуация здесь, в общем, не самая благоприятная, однако не является нездоровой согласно классификации AQI.

Класс № 3 включает в себя 49 городов (в основном на территории Восточной Европы и Италии). Приоритетные загрязнители здесь –

PM_{2.5}, PM₁₀, O₃. Атмосферный воздух этих городов на общеевропейском фоне характеризуется повышенными значениями AQI по всем загрязнителям, однако же с точки зрения общемировой классификации является достаточно благоприятным для здоровья человека.

Класс № 4 по структуре приоритетных загрязнителей соответствует классу № 3, однако значения AQI в городах класса № 4 ниже таковых для класса № 3. Класс № 4 является самым многочисленным и включает в себя 78 городов, равномерно распространённых по территории Европы. Именно города этого класса можно считать типичными для Европы с точки зрения качества атмосферного воздуха по оценке AQI.

Класс № 5 во многом напоминает класс № 4 с тем отличием, что здесь наблюдаются повышенные концентрации СО и немного меньшие концентрации PM_{2.5}, что, впрочем, не сильно влияет на общую оценку качества атмосферного воздуха в городах (16 городов в классе, не имеющих характерного тренда в пространственном распределении).

Оценка качества атмосферного воздуха по ИЗА₅, как было показано выше, даёт результаты, в значительной мере отличающиеся

от оценки по AQI. Индекс ИЗА₅ рассчитан для 84 городов Европы, 85% из которых попадают в категорию загрязнения атмосферы «низкое», 13% – в категорию «повышенное», и лишь 2% – в категорию «высокое» и «очень высокое». При этом наибольшее значение в итоговом индексе ИЗА₅, в отличие от индекса AQI, имеют концентрации озона и диоксида азота (а не PM₁₀ и PM_{2.5}).

Кроме классификации по суммарному значению ИЗА₅ также проведена многопараметрическая классификация городов по вкладу различных загрязнителей в данный индекс. Выделено 5 классов городов, обладающих схожими характеристиками по ИЗА загрязнителей (рис. 2).

Класс № 1 характеризуется средними значениями индекса ИЗА₅ при максимальной роли озона в его формировании. Значения среднегодовых концентраций других загрязнителей находятся на низком уровне (в сумме – менее 1/3 от ИЗА₅). В класс № 1 входит 23 города, расположенных в Северной Европе, и фрагментарно в остальной её части.

Класс № 2 представлен двумя городами в Польше – Краковом и Вроцлавом. Характерная черта атмосферного воздуха данных

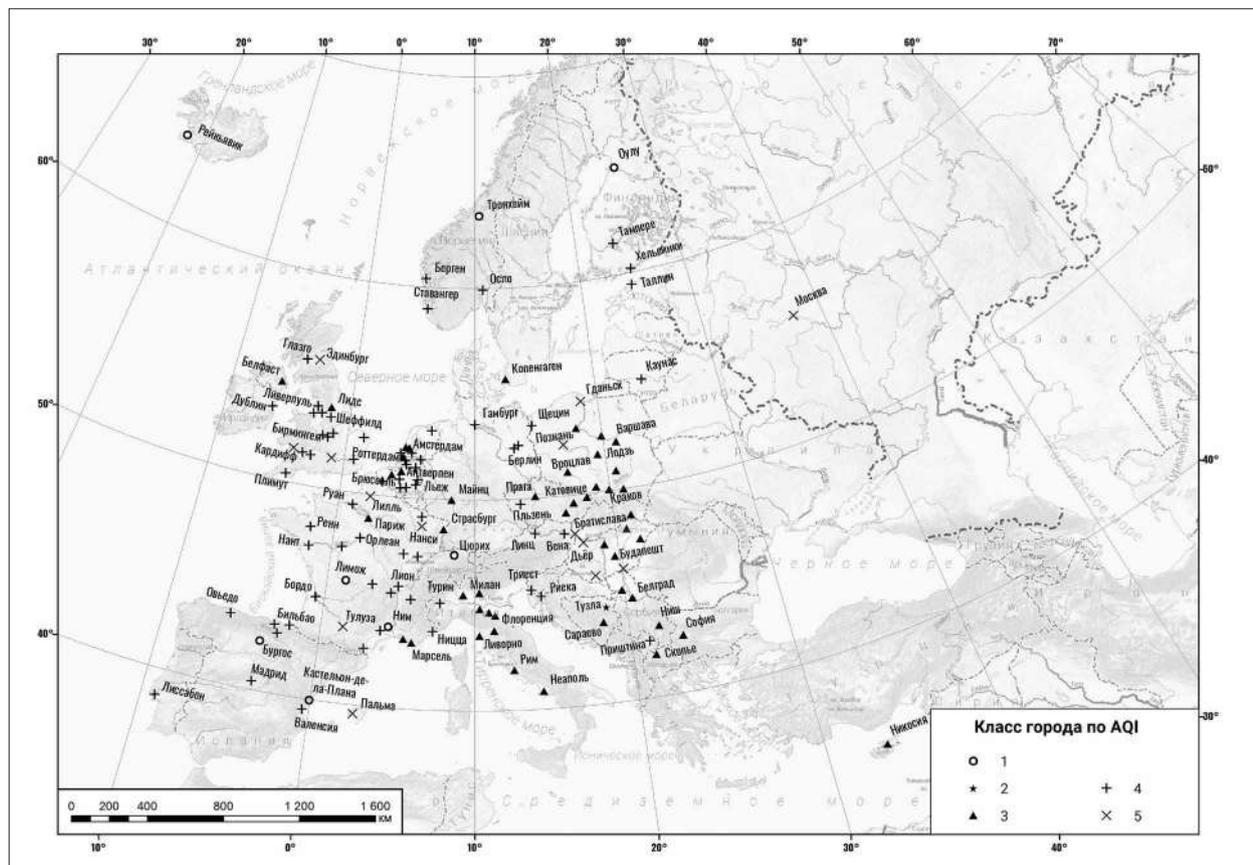


Рис. 1. Классификация городов Европы по значению AQI
Fig. 1. Classification of European cities by AQI value

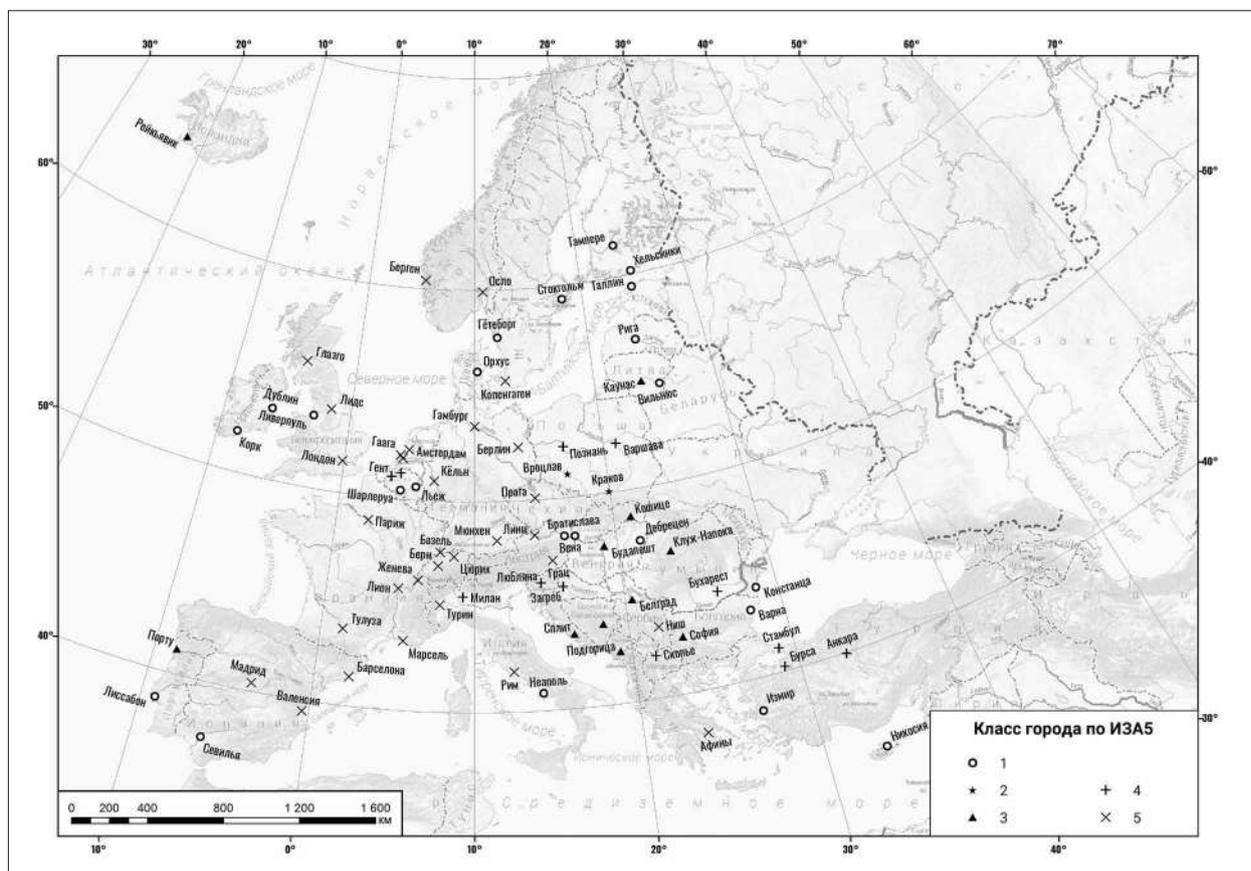


Рис. 2. Классификация городов Европы по значению ИЗА₅
 Fig. 2. Classification of European cities by IZA₅ value

городов – очень большие концентрации бенз[а]пирена, который является веществом наибольшего класса опасности, что обуславливает высокие и очень высокие значения ИЗА₅, (10,10 для Вроцлава и 20,56 для Кракова). Атмосферный воздух в этих городах сильно загрязнён.

Класс № 3 включает в себя 11 городов с наилучшими показателями загрязнения атмосферного воздуха. Практически по всем загрязнителям в городах, входящих в данный класс, отмечаются наименьшие их концентрации, а особенно – по озону и PM_{2.5}. Эти города находятся преимущественно на Балканском полуострове и в Восточной Европе, в то время как согласно классификации по AQI здесь наблюдались повышенные значения индекса.

Класс № 4 представляет собой набор городов с повышенным значением ИЗА₅. Причём это достигается равномерно за счёт практически всех наблюдаемых загрязнителей (за исключением озона). Значительные превышения над средними значениями концентраций можно наблюдать по взвешенным частицам PM₁₀ и PM_{2.5}. В данный класс входит 12 городов, расположенных в Турции, Польше,

Италии и Бельгии, что частично соответствует классификации по AQI.

Класс № 5 является эталонным для городов Европы. Сюда входит 36 городов, распределённых по всей её территории. Во всех из них общий уровень загрязнения по ИЗА₅ оценивается как низкий, нет характерных именно для этого класса типов загрязнителей.

Очевидно, что сформированные классы не вполне соответствуют друг другу. Это обстоятельство хоть и усложняет оценку качества атмосферного воздуха городов, но в то же время позволяет произвести более полную и всестороннюю оценку в силу методических различий в подходах к расчёту данных индексов. Поэтому была проведена многопараметрическая классификация 53 городов Европы, для которых рассчитан как индекс AQI, так и ИЗА₅. В данной классификации приняты во внимание совпадающие частные по загрязнителям и интегральные показатели AQI и ИЗА. Подобно предыдущим классификациям выделено 5 классов городов (рис. 3).

Класс № 1 представляет один город из Польши – Краков. Это единственный город по обоим первоначальным классификациям,

в котором качество атмосферного воздуха оценивается как пограничное с нездоровым, либо как нездоровое. Особенную проблему вызывают стабильно повышенные концентрации малых загрязнителей, таких как бенз[а]пирен, а также значительные концентрации $PM_{2.5}$. Поэтому в объединённой классификации качество воздуха для городов данного класса можно представить как пониженное, с увеличенным влиянием малых загрязнителей высокого класса опасности.

Класс № 2 – лучший с точки зрения экологической безопасности по обоим первоначальным вариантам классификации, тяготеет к территориям Северной Европы. Города, входящие в него, характеризуются минимальными значениями индексов AQI и $ИЗА_5$. В объединённой классификации этому классу присваивается значение качества воздуха высокое.

Класс № 3 представляет собой города, имеющие в общем неплохой уровень как по $ИЗА_5$, так и по AQI, однако значительно загрязнённые $PM_{2.5}$ (юг Восточной Европы и Балканский полуостров). По $ИЗА$ этого не видно, в силу неполноты исходных данных, однако оценка AQI чётко указывает на проблемную область в экологической безопасности данных городов. В объединённой классификации качество атмосферного воздуха

данного класса можно охарактеризовать как нормальное, с увеличенным влиянием взвешенных частиц $PM_{2.5}$.

Города класса № 4 находятся в верхней части классификаций среди рассматриваемых городов (города Западной Европы и Пиренейского полуострова). Уровень загрязнения воздуха здесь достаточно невысокий, равномерный, нет одного ярко выраженного загрязнителя. В объединённой классификации качество воздуха данного класса можно принять повышенным.

Класс № 5, наоборот, представляет собой совокупность городов из нижней части классификации (Восточная Европа и Италия), где концентрации значительной части загрязнителей, особенно озона и $PM_{2.5}$, превышают среднее значение по городам Европы. Однако, общий уровень загрязнения атмосферного воздуха в этих городах по общемировым меркам остаётся невысоким. Поэтому в объединённой классификации качество атмосферного воздуха городов данного класса характеризуется как нормальное, с увеличенным влиянием взвешенных частиц $PM_{2.5}$ и озона.

Карта объединённой классификации городов Европы по AQI и $ИЗА_5$ (рис. 4) показывает, что города одного класса явным образом образуют территориальные кластеры, чего не наблюдалось при первоначальных классифи-

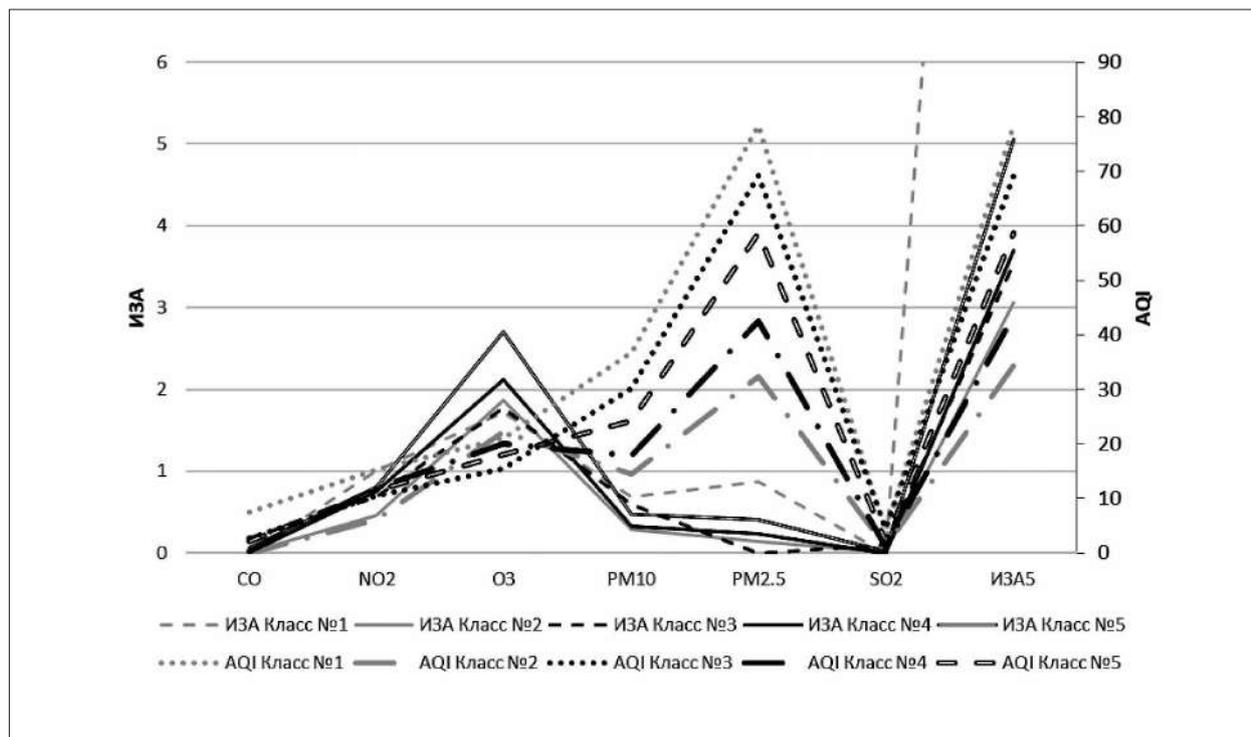


Рис. 3. Усреднённые значения $ИЗА_5$ и AQI для классов городов
 Fig. 3. Average AQI and $ИЗА_5$ values for city classes

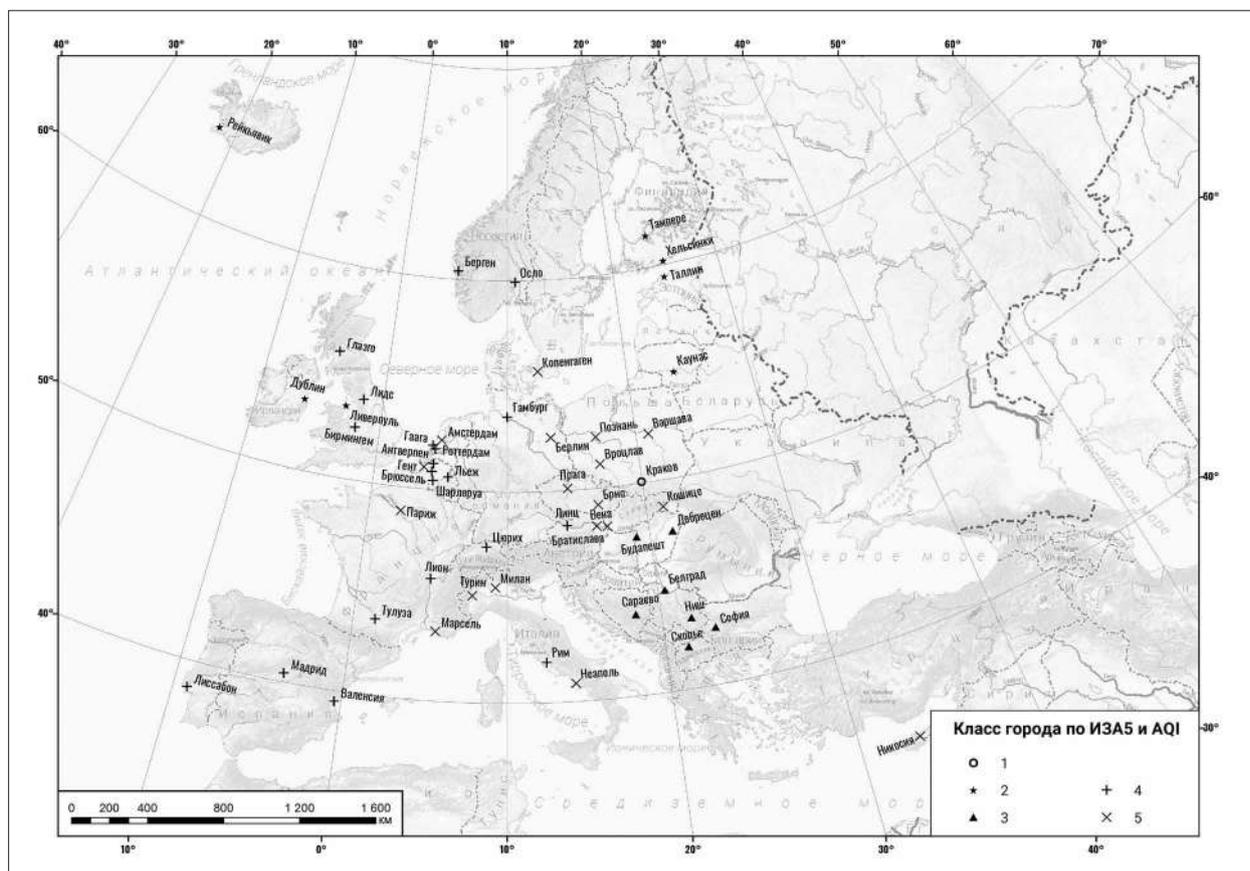


Рис. 4. Объединённая классификация городов Европы по AQI и ИЗА₅
 Fig. 4. United classification of European cities by AQI and IZA₅ value

кациях. Характер пространственного распределения этих кластеров в значительной степени коррелирует с экономико-географическим районированием Европы и объясняется уровнем экономического развития, структурой экономики и особенностями экологической политики государств.

Заключение

Значительные различия в используемых показателях и методиках их интегрирования в итоговый индекс при оценке степени загрязнённости атмосферы по ИЗА₅ и AQI вызывает методические сложности при попытке совместной оценки качества воздуха в городах. Но вместе с тем, это же позволяет точнее и полнее оценивать качество воздуха в городах, где возможен расчёт как индекса ИЗА₅, так и индекса AQI.

Исследование показало, что применение многопараметрических классификаций по отдельности для каждого из данных индексов не позволяет чётко и однозначно выделять типологические особенности классов в силу пробелов в исходных данных и специфиче-

ских проблем, определяемых методическими особенностями расчёта индексов. В то же время такая классификация, учитывающая оба индекса с их составными частями по отдельным загрязнителям, даёт чёткую картину качества атмосферного воздуха в городах как с точки зрения их типологического описания, так и с точки зрения пространственного распределения полученных классов городов по территории Европы.

По результатам многопараметрической классификации значений индексов AQI и ИЗА₅ выделено 5 классов городов Европы, относительно однородных по структуре и уровню загрязнения атмосферного воздуха. Данные классы на карте образуют чётко определяемые территориальные кластеры, в значительной степени коррелирующие с устойчивыми экономико-географическими районами Европы.

Результаты исследования являются важным шагом к решению задачи совместного анализа качества воздуха городов России и других стран мира, в том числе Европы, в условиях недостаточности данных благодаря выявлению закономерностей в возможных

значениях индексов AQI и ИЗА₅ для каждого класса городов по качеству атмосферного воздуха.

Статья подготовлена при поддержке Российского научного фонда (проект № 20-47-01001).

Литература

1. Регионы и города России: Интегральная оценка экологического состояния / Под ред. Н.С. Касимова. М.: ИП Филимонов Н.В., 2014. 560 с.
2. Калинин С.И., Торопова С.И. Статистические методы анализа взаимосвязи качества атмосферного воздуха и состояния здоровья детского населения Кировской области // Теоретическая и прикладная экология. 2019. № 2. С. 143–148.
3. Зайнуллин В.Г., Боднар И.С. Экологически обусловленная заболеваемость детского населения Республики Коми // Теоретическая и прикладная экология. 2012. № 2. С. 128–133.
4. Состояние загрязнения атмосферы в городах на территории России за 2019 г. Ежегодник. С-Пб.: ФГБУ «ГГО» Росгидромета, 2020. 249 с.
5. Битюкова В.Р., Касимов Н.С., Власов Д.В. Экологический портрет российских городов // Экология и промышленность России. 2011. № 4. С. 6–18.
6. Air Quality Index Basics [Электронный ресурс] <https://www.airnow.gov/aqi/aqi-basics/> (Дата обращения: 07.06.2021).
7. Какарека С.В. Оценка суммарного загрязнения атмосферного воздуха // География и природные ресурсы. 2012. № 2. С. 14–20.
8. European Air Quality Index Map [Электронный ресурс] <https://eea.europa.eu/themes/air/air-quality-index> (Дата обращения: 07.06.2021).
9. IQAir Air Quality Map [Электронный ресурс] <https://iqair.com/air-quality-map> (Дата обращения: 07.06.2021).
10. World Air Quality Index Data Platform [Электронный ресурс] <https://aqicn.org/data-platform/covid19> (Дата обращения: 07.06.2021).

11. Тикун В.С. Классификации в географии: ренессанс или увядание? (Опыт формальных классификаций). Москва-Смоленск: Изд-во СГУ, 1997. 367 с.

References

1. Regions and cities of Russia: the integrated assessment of the environment / Ed. N.S. Kasimov. Moskva: IP Filimonov N.V., 2014. 560 p. (in Russian).
2. Kalinin S.I., Toropova S.I. Statistical methods for analyzing the relationship between the quality of atmospheric air and the health status of the child population of the Kirov Region // Theoretical and Applied Ecology. 2019. No. 2. P. 143–148 (in Russian). doi: 10.25750/1995-4301-2019-2-143-148
3. Zainullin V.G., Bodnar I.S. Environmentally caused disease of children population of the Komi Republic // Theoretical and Applied Ecology. 2012. No. 2. P. 128–133 (in Russian). doi: 10.25750/1995-4301-2012-2-128-133
4. The state of air pollution in cities on the territory of Russia in 2019. Yearbook. Sankt-Peterburg: FGBU “GGO Rosgidrometa”, 2020. 249 p (in Russian).
5. Bitukova V.R., Kasimov N.S., Vlasov D.V. Ecological portrait of Russian cities // Ekologiya i promyshlennost Rossii. 2011. No. 4. P. 6–18 (in Russian).
6. Air Quality Index Basics [Internet resource] <https://www.airnow.gov/aqi/aqi-basics/> (Accessed: 07.06.2021).
7. Kakareka S.V. Assessment of the total air pollution // Geografiya i prirodnye resursy. 2012. No. 2. P. 14–20 (in Russian).
8. European Air Quality Index Map [Internet resource] <https://eea.europa.eu/themes/air/air-quality-index> (Accessed: 07.06.2021).
9. IQAir Air Quality Map [Internet resource] <https://iqair.com/air-quality-map> (Accessed: 07.06.2021).
10. World Air Quality Index Data Platform [Internet resource] <https://aqicn.org/data-platform/covid19> (Accessed: 07.06.2021).
11. Tikunov V.S. Classifications in geography: renaissance or fading? (Experience of formal classifications). Moskva-Smolensk: Izdatelstvo SGU, 1997. 367 p. (in Russian).

Биохимическая активность подзолистых почв на вырубках среднетаёжных еловых лесов

© 2023. Е. М. Перминова, м. н. с., Н. Н. Бондаренко, инженер-химик,
Т. Н. Щемелинина, к. б. н., с. н. с., Е. М. Лаптева, к. б. н., зав. отделом,
Институт биологии Коми научного центра Уральского отделения
Российской академии наук,
167982, Россия, г. Сыктывкар, ул. Коммунистическая, д. 28,
e-mail: perminova@ib.komics.ru

Выявлены особенности сезонного изменения активности почвенных ферментов (каталазы, дегидрогеназы, инвертазы) в органогенных и верхних минеральных горизонтах почв коренного ельника чернично-зеленомошного и его разновозрастных листовенно-хвойных производных. Установлено, что ферменты класса оксидоредуктаз (каталаза, дегидрогеназа) имеют тенденцию к увеличению активности к концу вегетационного периода. В проявлении инвертазной активности сезонная динамика выражена слабо. Применение широкого спектра методов статистического анализа показало, что, несмотря на отсутствие существенной разницы в параметрах активности отдельных ферментов, экологические условия формирования почвы на ранних этапах послерубочной сукцессии (участок ПП2) отличаются от участков коренного ельника (ПП4) и спелого березняка разнотравного (ПП3). Расчёт интегральных показателей (ИПБС и *GMea*) выявил возрастание биохимических параметров в верхней части органогенных горизонтов почв вырубок и их снижение – в минеральной части почвы по сравнению с почвой коренного ельника. Анализ полученных данных методом главных компонент показал, что физико-химические и биохимические свойства подзолистых почв в биоклиматических условиях средней тайги, в первую очередь, определяются спецификой (строением, составом и свойствами) подгоризонтов лесной подстилки, а также стадией послерубочной сукцессии (или возрастом фитоценоза).

Ключевые слова: таёжные леса, вырубки, подзолистые почвы, почвенные ферменты, интегральный показатель, среднее геометрическое ферментативной активности (*GMea*).

Biochemical activity of podzolic soils at the cuttings in middle taiga spruce forest

© 2023. E. M. Perminova ORCID: 0000-0002-8650-2524, N. N. Bondarenko ORCID: 0000-0001-5609-3283
T. N. Shchemelinina ORCID: 0000-0002-4052-6424, E. M. Lapteva ORCID: 0000-0002-9396-7979
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: perminova@ib.komics.ru

The features of seasonal changes in the activity of soil enzymes (catalase, dehydrogenase, invertase) in the organogenic and upper mineral soil horizons of the bilberry spruce forest and its uneven-aged deciduous-coniferous derivatives were revealed. It has been established that enzymes of the oxidoreductase class (catalase, dehydrogenase) tend to increase in activity by the end of the growing season. No seasonal dynamics was revealed in the manifestation of invertase activity. The use of a wide range of statistical analysis methods showed that, despite the absence of a significant difference in the parameters of the activity of individual enzymes, the environmental conditions of soil formation at the early stages of post-cutting succession (S2) differ from the areas of bilberry spruce forest (S1) and ripe birch forb forest (S3). The calculation of the integral indicators (IIBS and *GMea*) revealed an increase in biochemical parameters in the upper part of the organic horizons of the felled soils and their decrease in the mineral part of the soil compared to the soil of the indigenous spruce forest. The analysis of the obtained data using the principal component method showed that the physicochemical and biochemical properties of podzolic soils under the bioclimatic conditions of the middle taiga are primarily determined by the specificity (structure, composition, and properties) of the subhorizons of the forest litter, as well as the stage of post-cutting succession (or the age of the phytocenosis).

Keywords: middle taiga, cuttings, podzolic soils, soil enzymes, integral indicator, geometric mean of enzymatic activity (*GMea*).

Оценка состояния почвы как биокосной системы, определяющей устойчивое функционирование биогеоценоза, сопряжена с трудностями в плане выбора наиболее информативных показателей. К таким показателям относят параметры активности в почвах различных ферментов [1, 2]. Ферменты играют важную роль в процессах почвообразования, они не только участвуют в биохимических процессах, но и осуществляют взаимосвязь между всеми компонентами экосистемы [3, 4]. Комплексный анализ ферментативной активности (ФА) почв, характеризующейся, с одной стороны, высокой чувствительностью к внешним воздействиям, с другой – простотой определения и низкой погрешностью методов, даёт представление об экологическом состоянии такой сложной природной системы, как почва [2, 5].

В диагностических целях ФА почв активно используют при изучении влияния различных видов антропогенного воздействия на почвы. В настоящее время рассмотрены особенности ответной реакции ферментного пула почв на их загрязнение нефтью и нефтепродуктами [6, 7], тяжёлыми металлами (ТМ) и фтором [8, 9], на различные способы лесопользования [10, 11]. Отмечено снижение активности таких ферментов, как каталаза, инвертаза, дегидрогеназа, фосфатаза, липаза при загрязнении почв нефтепродуктами, ТМ и фтором. Однако данные, полученные при оценке влияния рубок леса на ФА почв, носят весьма противоречивый характер.

Известно, что интенсивность проявления активности ферментов в почвах тесно связана с особенностями функционирования растений

и их корневых систем, качеством растительного опада, влажностью и температурой почв, их окислительно-восстановительным режимом. Эти параметры имеют чётко выраженную сезонную динамику, что требует при оценке ФА почв учёта динамических аспектов изменения измеряемых показателей [12, 13].

Цель данной работы – оценка ферментативной активности почв и её сезонной динамики в ходе самовосстановительной сукцессии растительного покрова после проведения сплошнолесосечных рубок на территории средней тайги Республики Коми.

Материалы и методы исследования

Исследования проводили на базе почвенного стационара ИБ ФИЦ Коми НЦ УрО РАН (Республика Коми, Усть-Куломский р-н, средняя тайга). На стационаре проводятся долговременные исследования по изучению влияния промышленной заготовки древесины на автоморфные подзолистые почвы. Подробное описание геолого-геоморфологических и климатических условий, растительности, структуры почвенного покрова изучаемого района дано в работах [14, 15]. Краткое описание объектов исследования – коренного ельника черничного (ПП1), молодого лиственно-хвойного сообщества (ПП2) и спелого березняка разнотравного (ПП3) – приведено в таблице 1.

Исследования проводили в летне-осенний период через 8 лет после проведения рубки на участке ПП2 и через 40 лет – на участке ПП3. На каждом участке выполнен отбор образцов

Таблица 1 / Table 1

Краткая характеристика объектов исследования
Brief description of the objects of study

Показатель Indicator	Объект исследования / Object of study		
	ПП1 / S1	ПП2 / S2	ПП3 / S3
Растительность Vegetation	ельник черничный	лиственно-хвойный молодняк I класса возраста	спелый березняк разнотравный
Время проведения рубки Cutting time	не проводилась	зимний период 2001–2002 гг.	зимний период 1969–1970 гг.
Состав древостоя Stand composition	6Е4Пх+Б	5Б4Е1Пх	7Б2Е1Пх
Возраст древостоя, лет Stand age	60–230	7	36
Тип, подтип почвы Soil type	подзолистая с микропрофилем подзола глубокоглееватая	подзолистая с микропрофилем подзола поверхностно-глееватая	подзолистая глубокоглееватая
Строение профиля Soil profile	O-EL[e-hf]-ELf-BEL- BT-BCg-Cg	O-EL[e,hi-hf,g]-ELf- BEL-BT-BC(g)	O-EL(n,g)-ELf-BEL- BT-BCg-Cg

органогенных (с разделением на подгоризонты O_1, O_2, O_3) и минеральных (подзолистых) горизонтов в 8–10 кратной повторности. Из них готовили смешанные образцы для физико-химических и биохимических исследований.

Полевую влажность почв определяли весовым методом, рН водной ($pH_{\text{водн.}}$) и солевой ($pH_{\text{сол.}}$) вытяжек – в соответствии с ГОСТ 26423-85. Содержание в образцах почв общего углерода ($C_{\text{общ.}}$) и азота ($N_{\text{общ.}}$) измеряли на элементном анализаторе EA-1110 (Carlo Erba), углерода ($C_{\text{вов.}}$) и азота ($N_{\text{вов.}}$) водорастворимых соединений – на анализаторе ТОС-VCPN (Япония, Shimadzu) в ЦКП «Хроматография» ИБ ФИЦ Коми НЦ УрО РАН. Активность ферментов каталазы (КА), дегидрогеназы (ДГА) и инвертазы (ИА) исследовали в соответствии с методическими руководствами [1, 16].

Совокупность полученных показателей оценивали на основе расчёта интегрального показателя биологического состояния почвы (ИПБС) [1, 2], относительного показателя активности отдельно взятого фермента – *Cat* [7] и среднего геометрического значения – *GMea* [2, 4, 7, 17, 18] в соответствии с формулами 1, 2 и 3:

$$\text{ИПБС} = \frac{B_{\text{ср.}}}{B_{\text{ср.к}}} \cdot 100\%, \quad (1)$$

где $B_{\text{ср.}}$ – средний оценочный балл изученных показателей; $B_{\text{ср.к}}$ – средний оценочный балл всех показателей для почвы контрольного участка.

$$\text{Cat} = \frac{\text{Cat}_{\text{ф}}}{\text{Cat}_{\text{к}}} \cdot 100, \quad (2)$$

где *Cat* – относительный оценочный балл показателя, %; $\text{Cat}_{\text{ф}}$ – фактическое значение показателя; $\text{Cat}_{\text{к}}$ – значение показателя для почвы коренного ельника черничного.

$$\text{GMea} = \sqrt[3]{\text{Cat} \cdot \text{Deh} \cdot \text{Inv}}, \quad (3)$$

где *GMea* – среднее геометрическое ферментативной активности, %; *Cat* – относительный показатель активности каталазы, %; *Deh* – дегидрогеназы, %; *Inv* – инвертазы, %.

Статистическую обработку данных проводили с применением пакета прикладных программ Microsoft Office Excel 2010 и статистического пакета R для обработки данных в экологии [19].

Результаты и обсуждение

Особенности строения и свойств почв вырубок. В биоклиматических условиях сред-

ней тайги в первые годы после проведения рубок (участок ПП2) происходит временное переувлажнение почв [14, 15]. Активизация в этих условиях роста долгомошных и сфагновых мхов в напочвенном покрове обусловила возрастание мощности органогенных горизонтов подзолистых почв на участке ПП2 и сохранение их сходства по качеству органического вещества, морфологическому строению и физико-химическим параметрам с аналогичными горизонтами целинных подзолистых почв контрольного участка ПП1 (табл. 2).

Восстановление древостоя на вырубках (участок ПП3) ведёт, с одной стороны, к последовательному восстановлению гидрологического режима почв и снижению поверхностного гидроморфизма; с другой – к изменению качественного состава поступающего на поверхность почв растительного опада, представленного преимущественно листовым опадом берёзы и осины, а также остатками травянистых растений напочвенного покрова [14]. Последнее способствует активизации функционирования почвенной биоты и уменьшению мощности органогенного горизонта до $5,9 \pm 0,7$ см. Для сравнения, на участке ПП1 мощность органогенного горизонта составила $7,8 \pm 1,1$ см, на участке ПП2 – $12,1 \pm 2,3$ см.

Сукцессионная смена растительности на вырубках в подзоне средней тайги и изменение качества растительного опада находят своё отражение в снижении на ранних стадиях сукцессии (ПП2) доли азота как в составе почвенного органического вещества в целом ($C/N = 29,3–31,9$), так и в составе водорастворимых органических соединений ($C/N = 35,4–46,3$) (табл. 2). По мере восстановления древостоя на вырубках (участок ПП3) на фоне снижения кислотности органогенных горизонтов почв наблюдается некоторое возрастание обеспеченности азотом почвенного органического вещества и его водорастворимых компонентов (C/N соответственно $23,1–24,8$ и $24,1–32,8$).

Активность фермента каталазы. Одним из значимых параметров для диагностики экологического состояния почв является активность фермента каталазы (КА), который принимает участие в разложении перекиси водорода, образующейся в процессе дыхания живых организмов, на воду и молекулярный кислород [1, 16]. Согласно полученным нами данным, КА органогенного горизонта почвы коренного ельника (ПП1) в среднем составляет 4,2; молодого лиственно-хвойного сообщества (ПП2) – 3,1; спелого березняка разнотравного (ПП3) – $4,8 \text{ см}^3 \text{O}_2 / (\text{г} \cdot \text{мин})$, что соответствует средней

Таблица 2 / Table 2

Химические показатели почв исследуемых участков ($\bar{x} \pm \Delta$)*
 Chemical values of soils the studied areas ($\bar{x} \pm \Delta$)*

Горизонт Horizon	pH		C _{общ.} C _{total}	N _{общ.} N _{tot}	C/N	C _{воб.} C _{wsoc}	N _{воб.} N _{wsoc}	C/N
	H ₂ O	KCl						
ПП1 (коренной ельник черничный) / S1 (bilberry spruce forest)								
O ₁	5,2±0,3	4,5±0,3	36,2±7,9	1,6±0,4	26,4	16,5±5,6	0,65±0,58	29,7
O ₂	4,6±0,6	3,6±0,6	39,4±4,8	1,7±0,4	27,0	11,4±1,3	0,43±0,19	31,2
O ₃	4,3±0,4	3,2±0,2	32,4±5,3	1,4±0,3	27,0	10,1±1,0	0,36±0,18	32,8
EL[e]	3,9±0,3	3,1±0,2	2,7±0,5	0,2±0,04	15,8	1,2±0,1	0,03±0,02	53,7
ПП2 (молодое лиственно-хвойное сообщество) S2 (deciduous-spruce young growth)								
O ₁	4,9±0,4	4,4±0,7	32,6±12,5	1,3±0,5	29,3	13,1±6,3	0,43±0,35	35,4
O ₂	4,5±0,3	3,6±0,5	40,2±1,0	1,5±0,1	31,3	8,5±2,0	0,26±0,21	38,0
O ₃	4,0±0,3	3,0±0,2	32,8±5,3	1,2±0,2	31,9	9,8±1,8	0,25±0,15	46,3
EL[e],hi,g	4,0±0,1	3,1±0,1	2,1±0,5	0,1±0,01	24,5	1,2±0,3	0,02±0,02	57,1
ПП3 (спелый березняк разнотравный) / S3 (ripe birch forb forest)								
O ₁	5,7±0,3	5,2±0,8	36,5±15,6	1,8±0,8	23,7	13,3±2,4	0,64±0,51	24,1
O ₂	5,4±0,3	4,7±0,3	37,6±6,8	1,9±0,2	23,1	10,9±3,2	0,59±0,43	21,4
O ₃	4,7±0,2	3,7±0,2	25,5±11,0	1,2±0,3	24,8	8,8±2,7	0,31±0,28	32,8
EL	4,2±0,4	3,3±0,2	1,8±0,9	0,12±0,06	17,5	0,8±0,5	0,02±0,02	50,2

Примечание: * \bar{X} – среднее арифметическое; $\pm\Delta$ – границы доверительного интервала для $P > 0,95$ ($n = 8-9$).
 Note: * \bar{X} – arithmetical mean; $\pm\Delta$ – the confidence limits for $P > 0,95$ ($n = 8-9$).

степени обогащённости почв каталазой по [20]. Элювиальные (подзолистые) горизонты почв всех участков характеризуются очень бедным и бедным уровнем обогащённости ферментом каталазой – параметры КА варьируют в разные сроки отбора от нулевых значений до 2,6 см³ O₂ / (г · мин).

Исследованные нами почвы значительно различаются по параметрам КА в летний (июнь-июль) и осенний (сентябрь-октябрь) периоды (табл. 3). К концу вегетационного сезона отмечено существенное возрастание КА на всех участках. Такая динамика КА характерна для почв лесных экосистем, обусловлена поступлением свежего растительного опада и стимуляцией в связи с этим жизнедеятельности почвенных микроорганизмов [21]. Максимальными значениями КА практически во все сроки отбора отличались органогенные горизонты почвы спелого березняка разнотравного. Для минеральных горизонтов существенной разницы, за исключением отдельных дат отбора, в величине КА между участками не выявлено (табл. 3).

Активность фермента дегидрогеназы. Дегидрогеназы катализируют окислительно-восстановительные реакции путём дегидрирования органических веществ. В почвах

объектом дегидрирования могут быть как неспецифические органические соединения (углеводы, аминокислоты, спирты, жиры, фенолы и т. д.), так и специфические (гумусовые) вещества [1]. Минимальными значениями ДГА в рассмотренном нами ряду почв характеризуются горизонты лесной подстилки почвы коренного ельника (табл. 3). В среднем за все сроки отбора величина активности дегидрогеназы составила здесь 3,9; в то время как на участках молодого лиственно-хвойного сообщества и спелого березняка – 6,0 и 4,6 мгТФФ / (г · 24 ч) соответственно. Более высокие значения ДГА на участке ПП3 по сравнению с ПП1 обусловлены в первую очередь различиями в качестве органического материала, поступающего с опадом на поверхность почвы и включающегося в процессы его трансформации [14], а на участке ПП2 – присутствием порубочных остатков [22], являющихся дополнительным и долговременным источником поступления органических веществ [10]. В минеральной части почв всех рассмотренных участков параметры ДГА резко снижаются и составляют на участке ПП1 не более 13% от таковой в лесной подстилке, на участках ПП2 и ПП3 – не более 7,6 и 4,2% соответственно (табл. 3). Степень

Таблица 3 / Table 3

Сезонное изменение показателей ферментативной активности почв ($\bar{X} \pm \sigma$)* спелого ельника черничного (ПП1), лиственно-елового молодняка (ПП2) и спелого березняка разнотравного (ПП3)
 Season changes in indicators of soil enzymatic activity: bilberry spruce forest (S1), deciduous-spruce young growth (S2) and ripe birch forb forest (S3)

Участок Site	Горизонт Horizon	Июнь June	Июль July	Сентябрь September	Октябрь October
Каталаза, см ³ O ₂ /(г · мин) / Catalase, O ₂ cm ³ /(g · min)					
ПП1 S1	O ₁	1,9±0,3	2,0±0,1	5,7±0,6	7,4±0,2
	O ₂	2,3±0,3	2,3±0,4	6,0±0,3	5,1±0,4
	O ₃	3,1±0,4	2,2±0,8	5,3±0,3	5,9±0,3
	EL[e]	0,6±0,2	0,1±0,0	1,8±0,1	1,6±0,2
ПП2 S2	O ₁	3,0±0,5	1,9±0,1	4,9±0,1	3,6±0,2
	O ₂	1,6±0,2	1,0±0,3	4,4±0,2	4,7±0,4
	O ₃	1,9±0,1	1,5±0,7	4,3±0,3	2,8±0,2
	EL[e],hi,g	0,4±0,2	0,0±0,0	2,4±0,2	1,5±0,2
ПП3 S3	O ₁	4,7±0,1	3,8±0,3	6,9±0,2	3,4±1,1
	O ₂	4,0±0,2	3,5±0,7	6,2±0,2	4,3±0,4
	O ₃	1,7±0,3	4,1±0,1	6,4±0,2	7,0±0,4
	EL	0,1±0,0	0,6±0,1	1,4±0,1	1,4±0,1
Дегидрогеназа, мг ТФФ/(г · 24 ч) / Dehydrogenase, mg TPP/(g · 24 h)					
ПП1 S1	O ₁	5,09±0,25	4,87±0,24	5,55±0,28	4,51±0,23
	O ₂	4,19±0,21	4,37±0,22	4,51±0,23	3,88±0,19
	O ₃	2,71±0,14	2,52±0,13	2,16±0,11	2,71±0,14
	EL[e]	0,72±0,04	0,54±0,03	0,34±0,02	0,54±0,03
ПП2 S2	O ₁	5,19±0,26	5,50±0,28	3,16±0,16	6,90±0,35
	O ₂	5,82±0,29	5,95±0,30	7,89±0,39	7,71±0,39
	O ₃	4,55±0,23	5,68±0,28	8,03±0,40	4,82±0,24
	EL[e],hi,g	0,45±0,02	0,59±0,03	0,49±0,02	0,41±0,02
ПП3 S3	O ₁	5,91±0,30	5,50±0,28	4,69±0,23	7,22±0,36
	O ₂	4,33±0,22	5,09±0,25	4,15±0,21	4,42±0,22
	O ₃	4,15±0,21	3,79±0,19	4,55±0,23	1,44±0,07
	EL	0,22±0,01	0,32±0,02	0,27±0,01	0,13±0,01
Инвертаза, мг глюкозы/(г · 24 ч) / Invertase, mg glucose/(g · 24 h)					
ПП1 S1	O ₁	20,6±0,9	22,9±0,3	13,8±0,8	18,1±0,2
	O ₂	24,2±0,5	24,4±1,7	13,3±0,7	23,1±1,0
	O ₃	25,2±1,6	21,3±1,6	20,4±2,2	20,2±1,7
	EL[e]	2,4±0,3	2,8±0,6	3,7±0,4	2,1±0,5
ПП2 S2	O ₁	16,3±1,0	16,1±2,2	18,4±1,2	19,5±1,6
	O ₂	20,8±0,5	18,1±3,1	20,3±1,9	17,9±0,1
	O ₃	24,9±3,5	23,1±0,6	24,8±1,4	24,9±0,7
	EL[e],hi,g	1,7±0,5	2,4±0,4	3,0±0,5	2,5±0,2
ПП3 S3	O ₁	26,6±4,8	27,7±0,9	25,7±0,6	22,8±2,0
	O ₂	28,1±0,3	28,9±3,2	25,4±0,8	23,0±0,5
	O ₃	17,5±1,1	28,4±1,8	23,1±2,7	19,9±2,7
	EL	1,5±0,9	2,5±0,04	2,2±0,2	2,1±0,7

Примечание: * \bar{X} – среднее арифметическое; ±σ – границы стандартного отклонения; n = 8–9.
 Note: * \bar{X} – arithmetical mean; ±σ – the limits of the standard deviation; n = 8–9.

обогащённости рассмотренных нами почв дегидрогеназой в минеральных горизонтах соответствует бедному или среднему уровню обогащённости ферментом, в органогенном – богатому или очень богатому [20].

В течение вегетационного сезона ДГА в подгорizontах лесной подстилки (гор. О) почвы коренного ельника (ПП1) варьирует незначительно, отмечен чёткий тренд снижения данного параметра во все сроки отбора от верхних подгорizontов подстилки к нижним (табл. 3). В почвах вырубок эта закономерность нарушена за счёт возрастания величины ДГА к нижней части органогенного горизонта (участок ПП2) и к концу вегетации (участки ПП2 и ПП3).

Активность фермента инвертазы. Проявление ИА в почвах тесно связано с образованием и трансформацией легко мобилизуемых органических соединений. Под действием инвертазы осуществляется процесс расщепления сахаров на глюкозу и фруктозу [16, 20] – основу функционирования микробного сообщества почв. Органогенные горизонты рассмотренных нами почв характеризуются средним уровнем обогащённости данным ферментом – в зависимости от участка и от подгорizontа подстилки величина ИА варьирует от $17,5 \pm 2,6$ до 26 ± 4 мг глюкозы/(г · 24 ч). Минеральные горизонты относятся к категории очень бедного уровня обогащённости инвертазой – в среднем величина ИА в под-

золистых горизонтах варьирует от $2,0 \pm 0,6$ до $2,8 \pm 1,1$ мг глюкозы/(г · 24 ч).

В отличие от КА и ДГА, параметры ИА наиболее стабильны в течение сезона в почве участка ПП2 – здесь отмечено минимальное варьирование этого показателя по срокам отбора (табл. 3). Это может быть обусловлено относительно более стабильными условиями поверхностного переувлажнения почвы на ранних этапах послерубочной сукцессии в течение вегетационного периода. На участках ПП1 и ПП3 наблюдается тенденция снижения величины ИА в осенний период, что может быть связано с естественными процессами вегетационного развития растений и снижением поступления в этот период корневых выделений на фоне активизации жизнедеятельности почвенной микробиоты [23].

Статистический анализ данных. Кластерный анализ полученных данных о величине ФА (4 срока отбора, 4 горизонта/подгорizontа, количество переменных – 12, количество наблюдений – 72) позволил выделить три кластера (рис. 1). Первый кластер объединил все показатели ФА почвы участка ПП2 по всем срокам отбора. Это свидетельствует о специфике сезонной динамики ФА подзолистой почвы на ранних стадиях послерубочной сукцессии (ПП2).

Второй и третий кластеры объединили данные ФА, полученные для участков ПП1 и ПП3, соответственно в летний (июнь, июль)

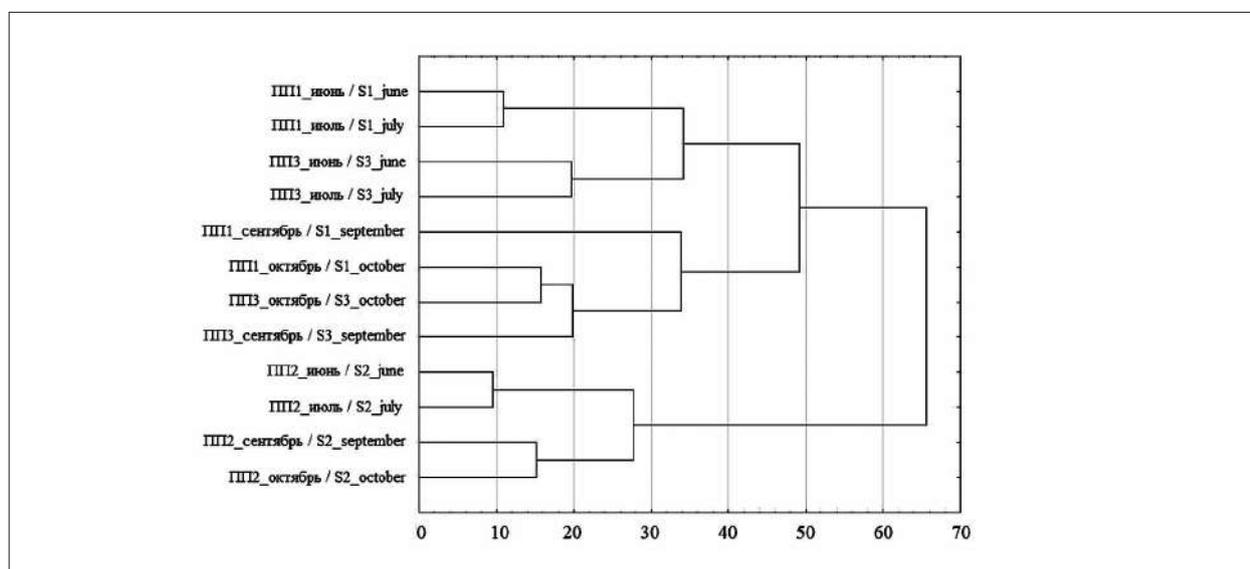


Рис. 1. Дендрограмма сходства сезонной динамики ферментативной активности почв: ПП1 – коренной ельник черничный; ПП2 – молодое лиственно-хвойное сообщество; ПП3 – спелый березняк разнотравный (кластеризация методом Уорда, метрика расстояния – Манхэттенское расстояние)
Fig. 1. Dendrogram of the similarity of the seasonal dynamics of the enzymatic activity of soils: S1 – bilberry spruce forest; S2 – deciduous-spruce young growth; S3 – ripe birch forb forest (Ward clustering, distance metric – Manhattan distance)

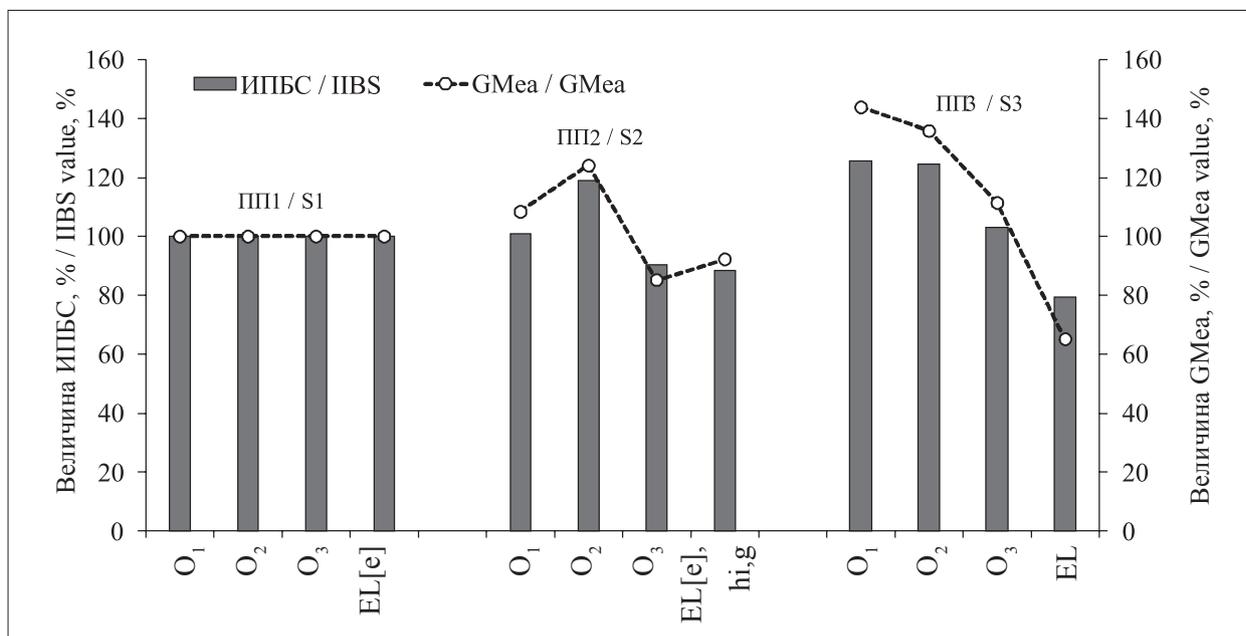


Рис. 2. Изменение параметров интегрального показателя биологического состояния почв (ИПБС) и среднего геометрического значения ферментативной активности (*GMea*) в исследованном ряду почв
Fig. 2. Change settings of Integral indicator of the biological state of the soil (PBS) and Geometric mean of enzymatic activity (*GMea*) in the studied soils

и осенний (сентябрь, октябрь) периоды. По всей видимости, последовательный рост и развитие древостоя на вырубках, сопровождающиеся на более поздних этапах послерубочной сукцессии восстановлением гидрологического режима почв и функционирования почвенной биоты, приводят к постепенному восстановлению особенностей сезонной динамики ФА подзолистых почв. Несмотря на сохраняющуюся на данном этапе существенную разницу в характере и свойствах органогенных горизонтов почв коренного ельника черничного (ПП1) и спелого березняка (ПП3), формирующегося на вырубке, динамические аспекты функционирования ферментного пула в почве вырубки приближаются к таковым почвы ненарушенного участка.

Расчёт показателей ИПБС и *GMea*, используемых для комплексной оценки ФА почв [1, 2, 4, 7, 17, 18], показал следующее. В почвах вырубок параметры ИПБС и *GMea* в верхней части органогенных горизонтов (ПП2, ПП3) выше, а в их нижней части (ПП2) и минеральных горизонтах (ПП2, ПП3) – ниже, по сравнению с почвой коренного ельника (ПП1) (рис. 2). Это свидетельствует о нарушении естественных процессов функционирования подзолистых почв на этапах послерубочной сукцессии. Изменение физико-химических и биологических (биохимических) свойств почв вырубок адекватно отражает эти нарушения.

Анализ полученных данных методом главных компонент позволил оценить вклад каждого фактора (свойства) в различие между изучаемыми объектами и структурировать всё многообразие полученных данных. На рисунке 3А показано, как каждая из 9 выбранных переменных воспроизводится главными компонентами 1 (горизонтальная ось, 31,48%) и 2 (вертикальная ось, 20,68%). На активность фермента каталазы преимущественное влияние оказывают параметры кислотности почв, а также содержание углерода и азота водорастворимых органических соединений. Параметры дегидрогеназной активности в большей степени связаны с общим содержанием органического углерода в почвах и уровнем влажности почв. Наименьшее влияние на разделение исследуемых объектов оказывает каталитическая активность, обусловленная наличием в почвах соединений неорганической природы, способных катализировать реакцию расщепления перекиси водорода.

Группировка результатов по подгоризонтам лесной подстилки для всех участков по всем датам отбора выявила следующую закономерность. Фактор 1 (линия с максимальной дисперсией) чётко отделил нижние подгоризонты лесных подстилок всех исследованных почв (рис. 3В, левый нижний квадрант), а фактор 2 (линия с максимальной дисперсией остаточных данных) – данные по всем

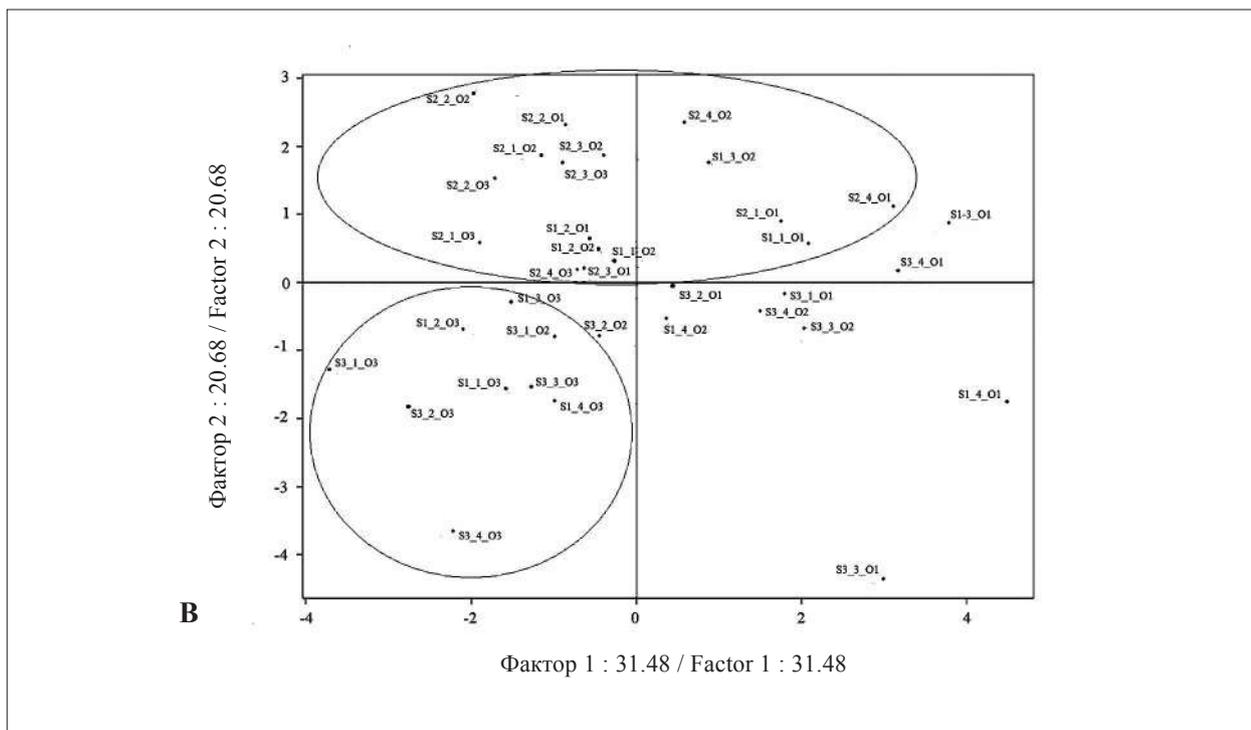
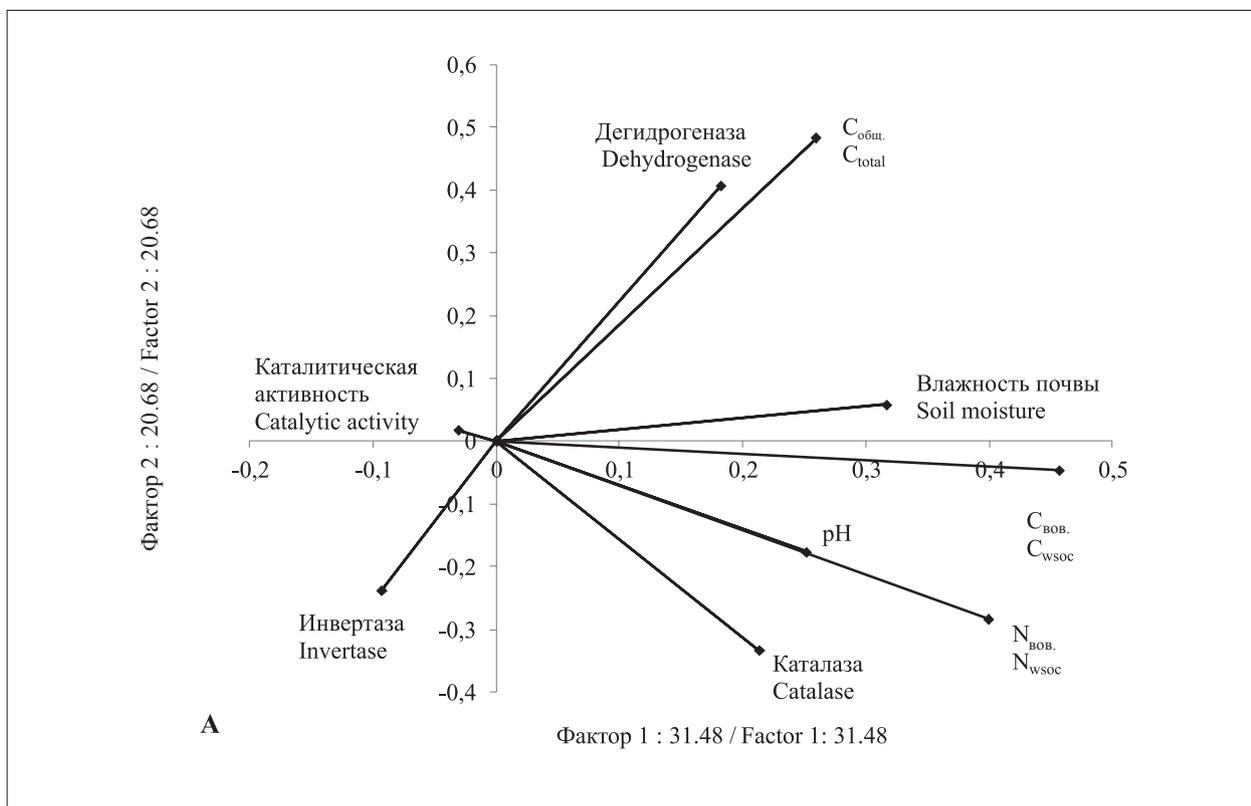


Рис. 3. Результаты анализа данных методом главных компонент: проекция главных компонент на факторную плоскость (А) и проекция наблюдений на факторную плоскость (В): ПП1 – коренной ельник черничный, ПП2 – молодое лиственно-хвойное сообщество, ПП3 – спелый березняк разнотравный. Даты отбора: 1 – июнь, 2 – июль, 3 – сентябрь, 4 – октябрь. Подгоризонты лесной подстилки: O₁, O₂, O₃

Fig. 3. Results of data analysis by principal component analysis: projection of principal components onto the factorial plane (A) and projection of observations onto the factorial plane (B): S1 – bilberry spruce forest; S2 – deciduous-spruce young growth; S3 – ripe birch forb forest. Dates: 1 – June, 2 – July, 3 – September, 4 – October. Forest litter subhorizons: O₁, O₂, O₃

горизонтам и датам отбора для почвы участка ПП2 (рис. 3В, верхние квадранты). Это свидетельствует о том, что физико-химические и биохимические свойства подзолистых почв в биоклиматических условиях средней тайги в первую очередь определяются спецификой (строением, составом и свойствами) подгоризонтов лесной подстилки, а также стадией послерубочной сукцессии (возрастом фитоценоза).

Заключение

В результате проведённых исследований установлено, что для органогенных горизонтов автоморфных подзолистых почв еловых лесов и почв вырубок (молодое листовенно-хвойное сообщество, спелый березняк разнотравный) характерен средний (каталаза, инвертаза) и богатый (дегидрогеназа) уровни обогащённости ферментами. Минеральные горизонты почв отличаются очень бедным/бедным (каталаза, инвертаза) или бедным/средним (дегидрогеназа) уровнем обогащённости ферментами. Отмечено возрастание активности ферментов класса оксидоредуктаз (каталазы и дегидрогеназы) в исследованном ряду почв к концу вегетационного периода, что обусловлено дополнительным поступлением органического вещества с растительным опадом. Тенденция к снижению активности инвертазы к концу вегетации отмечена только для коренного леса (ПП1) и поздней стадии послерубочной сукцессии (ПП3). На ранних стадиях сукцессии (ПП2) сезонная динамика в активности инвертазы отсутствует.

Применение широкого спектра методов статистической обработки данных, а также использование расчётных показателей – интегрального показателя биологического состояния почвы (ИПБС) и среднего геометрического значения ферментативной активности (*GMea*) – позволили выявить особенности в проявлении биохимической активности почв вырубок. Установлено, что по мере восстановления древостоя на вырубках биохимическая активность возрастает в органогенных горизонтах почв и снижается в минеральных по сравнению с подзолистой почвой коренного елового леса. Ферментная система подзолистой почвы на ранних стадиях послерубочной сукцессии (молодое листовенно-хвойное сообщество), несмотря на сходство морфологического строения и свойств её органогенного горизонта с почвой коренного елового леса, функционирует в особых условиях и отлича-

ется параметрами и особенностями сезонной динамики ферментов от почв коренного леса и спелого березняка разнотравного. Об этом свидетельствуют данные кластерного анализа и статистического анализа данных методом главных компонент, которые выделяют почву листовенно-хвойного насаждения в отдельную группу. Таким образом, в биоклиматических условиях средней тайги физико-химические и биохимические свойства подзолистых почв, в первую очередь, определяются спецификой (строением, составом и свойствами) подгоризонтов лесной подстилки, а также стадией послерубочной сукцессии (возрастом фитоценоза).

Работа выполнена в рамках государственного задания ИБ ФИЦ Коми НЦ УрО РАН (регистрационный номер: 122040600023-8).

Литература

1. Казеев К.Ш., Колесников С.И. Биодиагностика почв: методология и методы исследований. Ростов-на-Дону: Издательство Южного федерального университета, 2012. 260 с.
2. Поляк Ю.М., Сухаревич В.И. Почвенные ферменты и загрязнение почв: биodeградация, биоремедиация, биоиндикация // *Агрохимия*. 2020. № 3. С. 83–93.
3. Хазиев Ф.Х. Экологические связи ферментативной активности почв // *Экобиотех*. 2018. Т. 1. № 2. С. 80–92.
4. García-Ruiz R., Ochoa V., Hinojosa M.B., Carreira J.A. Suitability of enzyme activities for the monitoring of soil quality improvement in organic agricultural systems // *Soil Biology and Biochemistry*. 2008. V. 40. No. 9. P. 2137–2145.
5. Хазиев Ф.Х. Функциональная роль ферментов в почвенных процессах // *Вестник Академии наук Республики Башкортостан*. 2015. Т. 20. № 2. С. 14–24.
6. Новоселова Е.И., Киреева Н.А. Ферментативная активность почв в условиях нефтяного загрязнения и её биодиагностическое значение // *Теоретическая и прикладная экология*. 2009. № 2. С. 4–12.
7. Anchugova E.M., Melekhina E.N., Markarova M.Yu., Shchemelinina T.N. Approaches to the assessment of efficiency of remediation of oil-polluted soil // *Eurasian Soil Science*. 2016. V. 49. No. 2. P. 234–237.
8. Пятакова Л.П. Изменение биологической активности почв в зависимости от содержания тяжёлых металлов и увлажнения // *Агрохимический вестник*. 2008. № 4. С. 37–39.
9. Zamulina I.V., Gorovtsov A.V., Minkina T.M., Mandzhieva S.S., Bauer T.V., Burachevskaya M.V. The influence of long-term Zn and Cu contamination in spolic technosols on water-soluble organic matter and soil biological activity // *Ecotoxicology and Environmental Safety*. 2021. V. 208. Article No. 111471.

10. Фахрутдинов А.И., Ямпольская Т.Д. Ферментативная активность и питательный режим почв на лесных вырубках // Известия Самарского научного центра РАН. 2016. Т. 18. № 2 (2). С. 530–533.

11. Казеев К.Ш., Солдатова В.П., Шхапавцев А.К., Шевченко Н.Е., Грабенко Е.А., Ермолаева О.Ю., Колесников С.И. Изменение свойств дерново-карбонатных почв после сплошной рубки в хвойно-широколиственных лесах северо-западного Кавказа // Лесоведение. 2021. № 4. С. 426–436.

12. Closa I., Goicoechea N. Seasonal dynamics of the physicochemical and biological properties of soils in naturally regenerating, unmanaged and clear-cut beech stands in northern Spain // European Journal of Soil Biology. 2010. V. 46. No. 3. P. 190–199.

13. Puissant J., Cecillon L., Mills R.T.E., Robroek B.J.M., Gavazov K., Danieli S.D., Spiegelberger T., Buttler A., Brun J.-J. Seasonal influence of climate manipulation on microbial community structure and function in mountain soils // Biology and Biochemistry. 2015. V. 80. P. 296–305.

14. Дымов А.А., Бобкова К.С., Тужилкина В.В., Ракина Д.А. Растительный опад в коренном ельнике и лиственно-хвойных насаждениях // Лесной журнал. 2012. № 3. С. 7–18.

15. Лаптева Е.М., Втюрин Г.М., Бобкова К.С., Каверин Д.А., Дымов А.А., Симонов Г.А. Изменение почв и почвенного покрова еловых лесов после сплошнолесосечных рубок // Сибирский лесной журнал. 2015. № 5. С. 64–76.

16. Хазиев Ф.Х. Методы почвенной энзимологии. М.: Наука, 2005. 252 с.

17. Gao Y.C., Wang J., Xu J., Kong X., Zhao L., Zeng D.H. Assessing the quality of oil-contaminated saline soil using two composite indices // Ecological Indicators. 2013. V. 24. P. 105–112.

18. Hinojosa M.B., García-Ruiz R., Viñegla B., Carreira J.A. Microbiological rates and enzyme activities as indicators of functionality in soils affected by the Aznalcóllar toxic spill // Soil Biology and Biochemistry. 2004. V. 36. No. 9. P. 1637–1644.

19. Новаковский А.Б. Взаимодействие Excel и статистического пакета R для обработки данных в экологии // Вестник ИБ Коми НЦ УрО РАН. 2016. № 3 (197). С. 26–33.

20. Звягинцев Д.Г., Асеев И.В., Бабьева И.П., Мирчинк Т.Г. Методы почвенной микробиологии и биохимии. М.: Изд-во МГУ, 1980. 224 с.

21. Переверзев В.Н. Современные почвенные процессы в биогеоценозах Кольского полуострова. М.: Наука, 2006. 153 с.

22. Osipov A.F., Tuzhilkina V.V., Dymov A.A., Bobkova K.S. Phytomass and organic carbon stocks in the middle taiga spruce forests during restoration after clear cutting // Biology Bulletin. 2019. V. 46. No. 2. P. 210–218.

23. Brackin R., Robinson N., Lakshmanan P., Schmidt S. Microbial function in adjacent subtropical for-

est and agricultural soil // Soil Biology and Biochemistry. 2013. V. 57. P. 68–77.

References

1. Kazeev K.Sh., Kolesnikov S.I. Biodiagnostic of soil: the methodology and methods of researches. Rostov-on-Don: Publishing house of Southern Federal University, 2012. 260 p. (in Russian).

2. Polyak Yu.M., Sukharevich V.I. Soil enzymes and soil pollution: biodegradation, bioremediation, bioindication // Agricultural Chemistry. 2020. No. 3. P. 83–93 (in Russian). doi: 10.31857/S0002188120010123

3. Khaziev F.Kh. Ecological relations of the enzymatic activity of soil // Ecobiotech Journal. 2018. V. 1. No. 2. P. 80–92. doi: 10.31163/2618-964X-2018-1-2-80-92

4. García-Ruiz R., Ochoa V., Hinojosa M.B., Carreira J.A. Suitability of enzyme activities for the monitoring of soil quality improvement in organic agricultural systems // Soil Biology and Biochemistry. 2008. V. 40. No. 9. P. 2137–2145. doi: 10.1016/j.soilbio.2008.03.023

5. Khaziev F.Kh. Functional role of enzymes in soil processes // Vestnik Akademii nauk Respubliki Bashkortostan. 2015. V. 20. No. 2. P. 14–24 (in Russian).

6. Novocelova E.I., Kireeva N.A. Enzymatic activity of soils under conditions of oil pollution and its biodiagnostic significance // Theoretical and Applied Ecology. 2009. No. 2. P. 4–12 (in Russian). doi: 10.25750/1995-4301-2009-2-004-012

7. Anchugova E.M., Melekhina E.N., Markarova M.Yu., Shchemelinina T.N. Approaches to the assessment of efficiency of remediation of oil-polluted soil // Eurasian Soil Science. 2016. V. 49. No. 2. P. 234–237. doi: 10.1134/S1064229316020022

8. Pyatakova L.P. Changes in the biological activity of soils depending on the content of heavy metals and moisture // Agrokhimicheskiy vestnik. 2008. No. 4. P. 37–39 (in Russian).

9. Zamulina I.V., Gorovtsov A.V., Minkina T.M., Mandzhieva S.S., Bauer T.V., Burachevskaya M.V. The influence of long-term Zn and Cu contamination in spolic technosols on water-soluble organic matter and soil biological activity // Ecotoxicology and environmental safety. 2021. V. 208. Article No. 111471. doi: 10.1016/j.ecoenv.2020/111471

10. Fakhrutdinov A.I., Yampolskaya T.D. Enzymatic activity and nutritious mode of soils at forest cuttings // Proceedings of the Samara Scientific Center of the Russian Academy of Sciences. 2016. V. 18. No. 2 (2). P. 530–533 (in Russian).

11. Kazeev K.Sh., Soldatov V.P., Shkhapavtsev A.K., Shevchenko N.Ye., Grabenko Ye.A., Yermolaeva O.Yu., Kolesnikov S.I. Changes in the properties of calcareous soils after clearcutting in the coniferous-deciduous forests of the Northwestern Caucasus // Russian Journal of Forest Science. 2021. No. 4. P. 426–436 (in Russian). doi: 10.31857/S0024114821040069

12. Closa I., Goicoechea N. Seasonal dynamics of the physicochemical and biological properties of soils in naturally regenerating, unmanaged and clear-cut beech stands in northern Spain // *European Journal of Soil Biology*. 2010. V. 46. No. 3. P. 190–199. doi: 10.1016/j.ejsobi.2010.04.003
13. Puissant J., Cecillon L., Mills R.T.E., Robroek B.J.M., Gavazov K., Danieli S.D., Spiegelberger T., Buttler A., Brun J.-J. Seasonal influence of climate manipulation on microbial community structure and function in mountain soils // *Biology and Biochemistry*. 2015. V. 80. P. 296–305. doi: 10.1016/j.soilbio.2014.10.013
14. Dymov A.A., Bobkova K.S., Tuzhilkina V.V., Rakina D.A. Plant litter in the primary spruce forest and deciduous-coniferous plantations // *Lesnoy Zhurnal*. 2012. No. 3. P. 7–18 (in Russian).
15. Lapteva E.M., Vtyurin G.M., Bobkova K.S., Kaverin D.A., Dymov A.A., Simonov G.A. Changes in soils and soil cover of spruce forests after clear-cutting // *Siberian Journal of Forest Science*. 2015. No. 5. P. 64–76 (in Russian). doi: 10.15372/SJFS20150505
16. Khaziev F.Kh. *Methods of soil enzymology*. Moskva: Nauka, 2005. 252 p. (in Russian).
17. Gao Y.C., Wang J., Xu J., Kong X., Zhao L., Zeng D.H. Assessing the quality of oil-contaminated saline soil using two composite indices // *Ecological Indicators*. 2013. V. 24. P. 105–112. doi: 10.1016/j.ecolind.2012.06.005
18. Hinojosa M.B., García-Ruiz R., Viñegla B., Carreira J.A. Microbiological rates and enzyme activities as indicators of functionality in soils affected by the Aznalcóllar toxic spill // *Soil Biology and Biochemistry*. 2004. V. 36. No. 9. P. 1637–1644. doi: 10.1016/j.soilbio.2004.07.006
19. Novakovskiy A.B. Interaction between excel and statistical package r for ecological data analysis // *Vestnik IB Komi Scientific Center of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences*. 2016. No. 3 (197). P. 26–33 (in Russian).
20. Zvyagintsev D.G., Aseev I.V., Babeva I.P., Mirchink T.G. *Methods of soil microbiology and biochemistry*. Moskva: Izd-vo MGU, 1980. 224 p. (in Russian).
21. Pereverzev V.N. *Modern soil processes in the biogeocenoses of the Kola Peninsula*. Moskva: Nauka, 2006. 153 p. (in Russian).
22. Osipov A.F., Tuzhilkina V.V., Dymov A.A., Bobkova K.S. Phytomass and organic carbon stocks in the middle taiga spruce forests during restoration after clear cutting // *Biology Bulletin*. 2019. V. 46. No. 2. P. 210–218. doi: 10.1134/S1062359019020109
23. Brackin R., Robinson N., Lakshmanan P., Schmidt S. Microbial function in adjacent subtropical forest and agricultural soil // *Soil Biology and Biochemistry*. 2013. V. 57. P. 68–77. doi: 10.1016/j.soilbio.2012.07.015

Запасы углерода в почвах лесов Красноярского края: анализ роли типа почвы и древесной породы

© 2023. А. Ф. Осипов¹, к. б. н., с. н. с., В. В. Старцев¹, к. б. н., м. н. с.,
А. С. Прокушкин², к. б. н., зав. лабораторией,
А. А. Дымов^{1,3}, д. б. н., в. н. с., профессор,
¹Институт биологии Коми научного центра
Уральского отделения Российской академии наук,
167982, Россия, г. Сыктывкар, ул. Коммунистическая, д. 28,
²Институт леса им. В. Н. Сукачёва –
обособленное подразделение ФИЦ КНЦ СО РАН,
660036, Россия, г. Красноярск, Академгородок № 50,
³Московский государственный университет им. М. В. Ломоносова,
119991, Россия, г. Москва, ул. Колмогорова, д. 1,
e-mail: osipov@ib.komisc.ru

Почвы являются крупнейшим резервуаром органического углерода наземных экосистем. Однако существующие оценки запасов органического углерода почвы ($C_{\text{орг}}$) характеризуются большими разбросами, что требует совершенствования методов расчётов $C_{\text{орг}}$, к которым можно отнести вычисление среднего запаса $C_{\text{орг}}$ для отдельных типов почв под разной растительностью. Цель настоящей работы – оценить средние запасы $C_{\text{орг}}$ в зависимости от типа почвы и преобладающей древесной породы для лесных экосистем Красноярского края. Расчёты были проведены для слоёв 0–30, 0–50 и 0–100 см минеральной части почвы и не включали углерод в лесной подстилке. Оценки усреднённых запасов выполнены по данным собственных исследований и описаниям почв, приведённым в литературе для лесов Красноярского края. Более высокая (24 ± 6 кг/м²) концентрация углерода наблюдалась в серых почвах, наименьшая – в подзолах ($6,2 \pm 0,7$ кг/м²). Установлено, что принадлежность к определённому типу почвы оказывала статистически достоверное влияние на запасы углерода во всех анализируемых слоях. Большая часть $C_{\text{орг}}$ концентрируется в слое 0–50 см, в котором сосредоточена основная масса корней растений. Тип преобладающей древесной породы не является статистически значимым фактором, определяющим $C_{\text{орг}}$. Рассчитанные нами величины $C_{\text{орг}}$ можно рассматривать как основу для создания базы данных по оценке запасов почвенного органического углерода в лесах Красноярского края.

Ключевые слова: углерод почвы, бореальные леса, Красноярский край.

Carbon stocks in forest soils of the Krasnoyarsk Region: analysis of soil and tree species role

© 2023. A. F. Osipov¹ ORCID: 0000-0003-0618-9660, V. V. Startsev¹ ORCID: 0000-0002-6425-6502,
A. S. Prokushkin² ORCID: 0000-0001-8721-2142, A. A. Dymov^{1,3} ORCID: 0000-0002-1284-082X

¹Institute of Biology of Komi Science Centre of the Ural Branch
of the Russian Academy of Sciences,
28, Kommunisticheskaya St., Syktyvkar, Russia, 167982,

²Sukachev Institute of Forest Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences Federal Research
Center “Krasnoyarsk Science Center of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences”,
Akademgorodok No. 50, Krasnoyarsk, Russia, 660036,

³Lomonosov Moscow State University,
1, Kolmogorova St., Moscow, Russia, 119991,
e-mail: osipov@ib.komisc.ru

Soils are the largest reservoir of organic carbon in terrestrial ecosystems. However, current estimates of pools of soil organic carbon (SOC) are characterized by the wide variations of obtained values. So, there is a requirement for upgrading of SOC calculation techniques. One of the ways is an evaluation of mean SOC for separate soil group or type of vegetation. The aim of this work is to determine mean SOC dependence on soil group and dominant tree species for forest

ecosystems of Krasnoyarsk Region. Calculations were carried out for next layers of mineral soil: 0–30 cm (reference layer FAO), 0–50 cm (root zone) and 0–100 cm (concentrates the most SOC of soil profile) that didn't include carbon stocks in forest litter. Estimates of the mean SOC were made according to our own research data obtained near ZOTTO (Zotino Tall Tower Observatory) and the results of soil descriptions given in the literature for the forests of the Krasnoyarsk Region. Higher concentration of carbon ($24 \pm 6 \text{ kg/m}^2$) was observed in Phaeozems but Albic Podzols contained the lowest stock of SOC ($6.2 \pm 0.7 \text{ kg/m}^2$). It was found that belonging to a certain soil group had a statistically significant effect on carbon stocks in all analyzed layers. Most of the SOC is concentrated in the 0–50 cm layer, which contains the bulk of plant roots. The type of dominant tree species is not a statistically significant factor in determining SOC. The values we have calculated can be considered as the basis for creating a database for subsequent estimates of SOC in the forests of the Krasnoyarsk Region.

Keywords: soil carbon, boreal forests, Krasnoyarsk Region.

Накопление в атмосфере парниковых газов, ведущих к изменению климата, обуславливает необходимость оценки углеродного цикла лесных экосистем планеты для разработки мероприятий по снижению негативных эффектов углеродсодержащих газов [1]. Леса бореального пояса являются значимым резервуаром органического углерода планеты, большая часть которого (около 70%) содержится в их почвах [2]. Поэтому уточнение запасов органического углерода почвы ($C_{\text{орг}}$) важно для разработки стратегий устойчивого развития и прогноза изменения климата [3].

Красноярский край – один из крупнейших регионов России, где лесистость составляет 45% [4]. Преобладающими породами деревьев являются лиственница (*Larix* sp.) (44%) и сосна (*Pinus sylvestris* L.) (14%). Темнохвойные леса, сформированные елью (*Picea obovata* Ledeb.), пихтой (*Abies sibirica* Ledeb.) и кедром (*Pinus sibirica* Du Tour) занимают около 23%, березняки и осинники – 19%.

В настоящее время сведения о запасах $C_{\text{орг}}$ для отдельных экосистем региона приведены в ряде работ [5–7], в которых отмечен значительный разброс величин $C_{\text{орг}}$ в зависимости от условий формирования экосистемы. Можно предположить, что одним из путей снижения разброса величин при оценках $C_{\text{орг}}$ для региона в целом может быть расчёт средних значений в зависимости от типа почвы или лесорастительных условий с последующей аппроксимацией на занимаемую ими площадь [8].

Цель настоящей работы – оценить средние значения запасов органического углерода в верхних слоях сезонно-промерзающих почв мощностью 30, 50 и 100 см под разными древесными породами в лесных экосистемах Красноярского края.

Объекты и методы исследования

По аналогии с [8] в данной работе применялся комплексный подход, представляющий

Таблица 1 / Table 1

Источники данных и распределение количества почвенных описаний по типам почв и древесным породам / Literature sources and distribution of soil descriptions on soil groups and tree species

Источник литературы Literature source	Количество разрезов / Number of soil pits		
	общее total	распределение / distribution	
		тип почвы soil group	древесная порода tree species
10	1	D (1)	C(1)
11	18	D(8), Gr(8), P(2)	Dc(1), L(2), Drc(2), C(13)
12	1	Gr	Dc (1)
13	1	P(1)	Drc (1)
14	1	P(1)	Dc (1)
15	7	D(2), P(5)	Dc (1), Drc (6)
16	3	D (3)	Dc (1), Drc (2)
17	1	Gr(1),	Dc (1)
Собственные данные / Own data	6	Pz (3), P (3)	C (3), Drc (3)

Примечание. Тип почвы: Pz – подзолы, P – подзолистые, D – дерново-подзолистые почвы, Gr – серые. Породы деревьев: Dc – лиственные (берёза, осина), L – лиственница, Drc – темнохвойные (ель, пихта, кедр), C – сосна. В скобках приведено количество разрезов.

Note. Soil groups: Pz – Albic Podzols, P – Haplic Retisols, D – Umbric Retisols, Gr – Phaeozems. Dc – deciduous (*Betula* sp., *Populus tremula* L.) tree species; L – *Larix sibirica* Ledeb., Drc – dark coniferous forest (*Picea obovata* Ledeb., *Abies sibirica* Ledeb., *Pinus sibirica* Du Tour), C – *Pinus sylvestris* L. The number of soil profiles is given in brackets.

собой сочетание собственных исследований и литературных данных, содержащих описания почвенных разрезов на территории средней и южной тайги Красноярского края. Были проанализированы данные по 33 разрезам сезонно-промерзающих почв, включающие информацию о мощности и содержании гумуса в отдельных горизонтах (табл. 1). Собственные исследования проводили на шести разрезах подзолов и подзолистых почв, заложенных в окрестностях базы Среднеенисейского стационара Института леса им. В.Н. Сукачёва СО РАН (обсерватория ZOTTO, 60°43'–60°51' с. ш., 88°57'–89°34' в. д.). На подзолах произрастали сосновые леса, а на подзолистых почвах – темнохвойные. Следовательно, общее количество разрезов, по которым проводили расчёт, составило 39.

В соответствии с [9] были выделены следующие типы почв: подзолы (3 разреза), подзолистые (12 разрезов), дерново-подзолистые (14 разрезов) и серые (10 разрезов). По древесным породам участки были распределены следующим образом: сосняки – 17, темнохвойные леса (с преобладанием ели, кедра и пихты) – 14, лиственные (с преобладанием берёзы и осины) – 6, лиственничники – 2.

Описание разрезов, отбор проб на объёмный вес и химические анализы выполняли стандартными методами. В связи с тем, что литературные описания не содержали сведений об объёмном весе (ОВ) отдельных горизонтов, он рассчитывался по уравнениям зависимости ОВ от концентрации гумуса и глубины залегания горизонта для отдельных почвенных групп [18], которые дают достаточно достоверные величины [3]. Расчёт запасов углерода выполняли по формуле [19]:

$$C_{\text{орг.}} = 0,1 \cdot \text{ОВ} \cdot C \cdot H, \quad (1)$$

где $C_{\text{орг.}}$ – запас углерода в слое, кг/м²; ОВ – объёмный вес горизонта, г/см³; C – концентрация углерода, %; H – мощность горизонта, см; 0,1 – коэффициент для перевода в кг/м².

Расчёты запасов $C_{\text{орг.}}$ выполнены для слоёв 0–30, 0–50 и 0–100 см и не включали массу углерода в лесной подстилке. Выбор глубин связан с тем, что слой 0–30 см является эталонным слоем для оценки запасов $C_{\text{орг.}}$ в подразделениях Продовольственной и сельскохозяйственной Организации Объединённых Наций [3, 20]. Слой 0–50 см часто используется при оценках $C_{\text{орг.}}$ на региональном уровне, поскольку в этой толще происходит трансформация органического вещества почв после изменения

режима землепользования. Иногда этот слой называют «ризосферой» из-за расположения здесь большей массы корней растений и связанных с ними почвенных микроорганизмов, выделения которых непосредственно влияют на свойства почвы. На глубине 0–100 см сосредоточена большая часть $C_{\text{орг.}}$ в почвенном профиле, и этот слой обычно учитывается при создании почвенных карт.

Описательная статистика наборов данных $C_{\text{орг.}}$ включала среднее значение, его стандартную ошибку, минимальные/максимальные значения. Нормальность распределения наборов данных проверяли при помощи теста Шапиро-Уилка. Для оценки различий запасов $C_{\text{орг.}}$ в отдельных слоях между типами почв и древесными породами применяли ANOVA или его непараметрический аналог (критерий Краскела-Уоллиса) при распределении отличном от нормального. Парные сравнения выполнены при помощи *t*-критерия Стьюдента. Статистический анализ выполнен при уровне значимости 95% с использованием Microsoft Excel и R 4.03.

Результаты и обсуждение

Согласно полученным нами данным, запасы $C_{\text{орг.}}$ в верхнем метровом профиле подзолов в условиях средней тайги Красноярского края изменялись от 4,9 до 7,0 кг/м², а в подзолистых почвах – от 5,6 до 11,4 кг/м² (рис.). В подзолах на слой 0–30 см в среднем приходится 57% от $C_{\text{орг.}}$, содержащегося в метровом слое, тогда как в подзолистых почвах в нём сконцентрировано около 50% запасов углерода. В ризосфере (0–50 см) подзолов сосредоточено 77% от $C_{\text{орг.}}$ в слое 0–100 см, а в подзолистых почвах – 64%. Более значимая доля верхних горизонтов в общем запасе $C_{\text{орг.}}$ подзолов обусловлена относительно высокой концентрацией органического углерода в верхних слоях песчаных почв. В тяжёлых по гранулометрическому составу подзолистых почвах значительное снижение содержания углерода в нижних горизонтах не сопровождается соответствующим уменьшением его запасов вследствие увеличения объёмного веса почвы.

Запасы углерода в почвах варьируют в зависимости от типа почвы. В таблице 2 представлены результаты расчётов усреднённых значений запасов углерода в различных слоях почв с учётом их принадлежности к почвенному типу и в зависимости от древесной породы в лесных экосистемах Красноярского края. Установлено, что запасы $C_{\text{орг.}}$ метрового

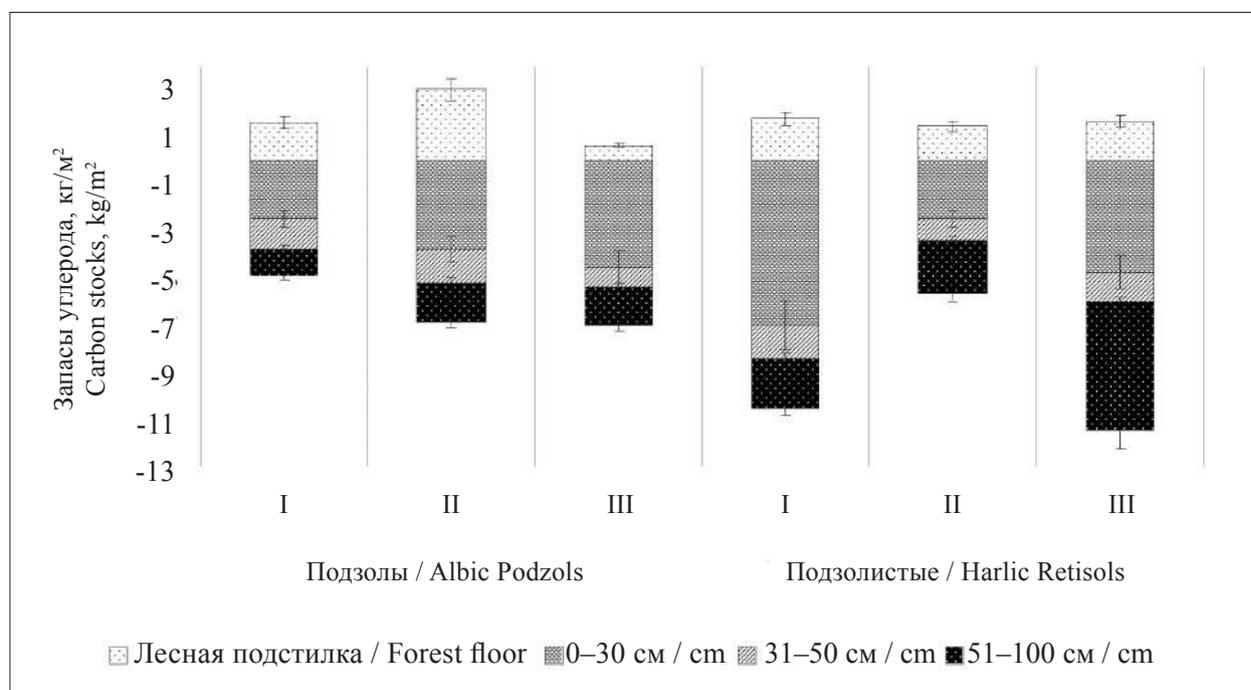


Рис. Запасы углерода в лесной подстилке и в верхнем метровом слое подзолов и типичных подзолистых почв (римские цифры – номера разрезов)
Fig. Carbon stocks in forest floor and upper 1-meter layer in Albic Podzols and Haplic Retisols. Roman numerals are numbers of soil profiles

профиля в разных типах почв изменяются от 6,2 до 24,3 кг/м², с более высокими значениями в серых почвах, низкими – в подзолах. Результаты факторного анализа показали, что тип почвы оказывает достоверное влияние на $C_{орг}$ в слое 0–100 см ($p = 0,006$). Однако не выявлены значимые различия в парах «дерново-подзолистые – подзолистые» ($p = 0,120$) и «дерново-подзолистые – серые почвы» ($p = 0,173$). Запасы $C_{орг}$ метрового профиля для остальных пар отличаются между собой ($p < 0,05$).

Согласно [21–23] средние значения $C_{орг}$ в слое 0–100 см, по которым в дальнейшем выполняются оценки запасов углерода в почвенном блоке крупных территорий, изменяются от 9,6 до 34,3 кг/м². Ранее было установлено [8], что средние запасы углерода в подзолах Республики Коми составили 3,80 кг/м², в подзолистых почвах – 7,69 кг/м², что ниже полученных нами результатов. По-видимому, более высокие значения $C_{орг}$ в подзолах Красноярского края по сравнению с Республикой Коми можно объяснить более частыми пожарами [24]. В то же время данные для подзолов исследуемого региона оказались несколько ниже, чем средние величины, приводимые в [21–23], что, вероятно, обусловлено небольшим количеством почвенных описаний, включённых в расчёт, и лёгким гранулометрическим составом почв. Однако для остальных почвенных

типов рассчитанные средние величины находятся в диапазоне существующих оценок. В работах [3, 8, 25] показано, что тип почвы является основным фактором, определяющим запасы $C_{орг}$ на региональном уровне. Следовательно, полученные средние оценки $C_{орг}$ для отдельных типов почв можно использовать при расчётах запасов углерода в почвенном блоке лесных экосистем Красноярского края.

Запасы углерода в верхних 30 см почвенного профиля характеризуются достаточно высокой вариабельностью. Так, меньший разброс (разница в 1,8 раза) значений отмечен для подзолов, более высокий (в 5,0 раз) – для серых почв. В дерново-подзолистых и подзолистых почвах эта величина изменялась в 3,0–4,4 раза соответственно. Выявлено, что этот слой концентрирует 48–59% от $C_{орг}$ метрового слоя, с меньшей долей в серых почвах. Тип почвы оказывает значимое ($p = 0,002$) влияние на запасы углерода в слое 0–30 см, достоверных различий между подзолистыми и дерново-подзолистыми почвами не отмечено ($p = 0,776$).

Запасы $C_{орг}$ в слое 0–50 см исследуемых типов почв изменяются от 4,8 до 15,6 кг/м², что составляет большую (64–77%) часть от слоя 0–100 см. Результаты факторного анализа показывают достоверное ($p = 0,002$) влияние типа почвы на массу углерода в этом слое. Од-

нако, как и в случае с вышележащим слоем, не выявлено различий между подзолистыми и дерново-подзолистыми почвами ($p = 0,565$). Ранее было показано [26], что основным фактором, определяющим значимое участие ризосферы в $C_{орг}$ метрового профиля, являются подземные органы растений. Во многом это связано с микроорганизмами, ассоциированными с корнями, выполняющими роль связующих агентов при создании агрегатов и органоминеральных комплексов, что способствует закреплению органического вещества в верхних горизонтах почвы [27, 28].

Важную роль в процессах почвообразования играет растительный опад, разложение которого происходит на поверхности почвы и в лесной подстилке, в результате чего пополняются запасы органического вещества. Как следствие, важным пулом углерода в лесных экосистемах являются лесные подстилки [23].

В исследованных нами подзолах они концентрируют $0,7-3,0$ кг/м² углерода, в подзолистых почвах – $1,5-1,8$ кг/м² (рис.), что составляет $10-44$ и $15-27\%$ от $C_{орг}$ верхнего метрового профиля соответственно. В работе [17] установлено, что в южной тайге Красноярского края в зависимости от условий произрастания лесные подстилки сосредотачивают $0,4-1,7$ кг/м² углерода. По данным [4] в органо-генном горизонте на поверхности почвы запасы углерода варьируют от $0,5$ до $0,9$ кг/м². Следовательно, наряду с пополнением базы данных по запасам $C_{орг}$ минеральной части почвы, необходим также сбор сведений об участии лесных подстилок в аккумуляции органического углерода с учётом условий произрастания растений и функционирования почв.

Запасы углерода в почвах варьируют в зависимости от преобладающей древесной породы. В условиях Красноярского края от-

Таблица 2 / Table 2
Средние запасы углерода в зависимости от типа почвы и лесообразующей породы, кг/м²
Dependence of average carbon stocks on the group of soils and tree species, kg/m²

Тип почвы/древесной породы Type of soil/tree species	Почвенный слой / Soil layer					
	0–30 см / cm		0–50 см / cm		0–100 см / cm	
	M±SE ¹	min–max	M±SE	min–max	M±SE	min–max
Типы почв / Soil groups						
Подзолы (3) ² Albic Podzols (3) ²	3,6±0,6	2,45–4,51	4,8±0,5	3,73–5,37	6,2±0,7	4,87–6,96
Подзолистые (12) Naplic Retisols (12)	7,1±0,7	2,44–10,77	9,0±0,9	3,37–14,60	11,1±1,0	5,64–16,65
Дерново-подзолистые (14) Umbric Retisols (14)	7,4±0,7	4,18–12,56	9,7±1,0	4,95–16,85	14,6±1,9	7,16–26,83
Серые (10) Phaeozems (10)	11,8±1,5	3,83–19,08	15,7±2,0	3,95–21,87	24±6	7,07–41,86
Влияние типа почвы ³ Influence of soil group ³	$F = 6,21,$ $p = 0,002$		$F = 6,05,$ $p = 0,002$		$F = 5,25,$ $p = 0,006$	
Древесные породы / Tree species						
Сосна (17) <i>Pinus sylvestris</i> L. (17)	7,2±1,0	2,12–17,03	9,9±1,4	3,14–21,87	16±5	4,62–41,86
Темнохвойные (14) Dark coniferous forest (14)	7,3±0,8	2,44–12,56	9,4±1,0	3,37–16,85	11,3±1,0	5,54–16,91
Лиственницы (6) Small-leaved (6)	10,1±2,1	3,83–19,08	12,0±2,5	3,95–21,49	16,3±3,4	7,07–29,70
Лиственница (2) <i>Larix sibirica</i> Ledeb	13,0±1,0	12,04–13,96	17,3±0,9	16,45–18,22	20,9±1,0	19,90–21,94
Влияние древесной породы Influence of tree specie	$F = 2,45,$ $p = 0,098$		$F = 1,67,$ $p = 0,190$		$\chi^2 = 3,19,$ $p = 0,360$	

Примечание: ¹ – среднее ± стандартная ошибка, ² – в скобках количество разрезов, ³ – оценка различий между группами типов почв/породами по данным факторного анализа (для ANOVA приведено значение F, для критерия Краскела-Уоллиса – значение χ^2).

Note: ¹ – Mean ± standard error; ² – The number of soil profiles is given in brackets; ³ – Estimation of differences between soil groups / tree species according to factorial analysis (F are given for ANOVA and χ^2 for Kruskal-Wallis H test).

носителем высокие запасы углерода во всех исследуемых слоях почвы отмечены в лиственничниках. Однако эти различия статистически не значимы ($p > 0,05$). Вместе с тем, наблюдаемое увеличение средних величин $C_{орг.}$ в ряду «сосняки → темнохвойные леса → лиственные леса → лиственничники» укладывается в существующие представления о запасах углерода в почвах лесов, сформированных разными древесными породами. Так, сосняки, преимущественно занимающие низкопродуктивные песчаные почвы, обычно характеризуются меньшими запасами $C_{орг.}$ по сравнению с лесами, представленными другими породами деревьев, произрастающими на более плодородных глинистых и суглинистых почвах. Различия в запасах $C_{орг.}$ лиственничников, темнохвойных и лиственных лесов, вероятно, обусловлены качественным составом растительного опада. Так, опад берёзы, осины и лиственницы имеет более узкое отношение углерода к азоту, что свидетельствует о его относительно высокой скорости деструкции и, следовательно, скорости образования гумусовых веществ по сравнению с опадом темнохвойных пород [4]. В результате происходит более интенсивное накопление органического вещества в почвах, развивающихся под этими древесными породами.

Заключение

Рассчитаны запасы $C_{орг.}$ в различных слоях почв Красноярского края с учётом типа почв и преобладающей древесной породы. Подзолы характеризовались меньшими (в среднем $6,22 \text{ кг/м}^2$) запасами углерода в верхнем метровом слое, наибольшие его запасы (в среднем $24,32 \text{ кг/м}^2$) отмечались в серых почвах. В подзолистых почвах сосредоточено $11,1 \pm 1,0 \text{ кг/м}^2$, в дерново-подзолистых – $14,6 \pm 1,9 \text{ кг/м}^2 C_{орг.}$. Выявлено, что корнеобитаемый слой (0–50 см) аккумулирует большую часть углерода в почвенном блоке. Установлено, что тип почвы оказывает статистически значимое влияние на запасы углерода в почвенном профиле. Достоверного влияния типа древесной породы, являющейся эдификатором лесной экосистемы, на $C_{орг.}$ не установлено.

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РФФИ № 19-29-05111-мк.

Литература

1. Paradis L., Thiffault E., Achim A. Comparison of carbon balance and climate change mitigation potential of

forest management strategies in the boreal forest of Quebec (Canada) // Forestry: An International Journal of Forest Research. 2019. V. 92. P. 264–277.

2. Bradshaw C.J.A., Warkentin I.G. Global estimates of boreal forest carbon stocks and flux // Global and Planetary Change. 2015. V. 128. P. 24–30.

3. Chernova O.V., Golozubov O.M., Alyabina I.O., Schepaschenko D.G. Integrated approach to spatial assessment of soil organic carbon in the Russian Federation // Eurasian Soil Science. 2021. V. 54. P. 325–336.

4. Лесные экосистемы Енисейского меридиана / Под ред. Ф.И. Плешиков. Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2002. 356 с.

5. Bird M.I., Santrůcková H., Arneš A., Grigoriev S., Gleixner G., Kalaschnikov Y.N., Lloyd J., Schulze E.-D. Soil carbon inventories and carbon-13 on a latitude transect in Siberia // Tellus B: Chemical and Physical Meteorology. 2002. V. 54. P. 631–641.

6. Czimeczik C.I., Schmidt M.W.I., Schulze E.-D. Effects of increasing fire frequency on black carbon and organic matter in Podzols of Siberian Scots pine forests // European Journal of Soil Science. 2005. V. 56. P. 417–428.

7. Gavrikov V.L., Sharafutdinov R.A., Knorre A.A., Pakharkova N.V., Shabalina O.M., Bezkorovaynaya I.N., Borisova I.V., Erunova M.G., Khlebopros R.G. How much carbon can the Siberian boreal taiga store: a case study of partitioning among the above-ground and soil pools // Journal of Forest Research. 2016. V. 27. No. 4. P. 907–912.

8. Osipov A.F., Bobkova K.S., Dymov A.A. Carbon stocks of soils under forest in the Komi Republic of Russia // Geoderma Regional. 2021. V. 27. Article No. e00427.

9. Классификация и диагностика почв России / Отв. ред. Г.В. Добровольский. Смоленск: Ойкумена, 2004. 342 с.

10. Вередченко Ю.П. Агрофизическая характеристика почв центральной части Красноярского края. М.: АН СССР, 1961. 175 с.

11. Горбачев В.Н. Почвы нижнего Приангарья и Енисейского края. М.: Наука, 1967. 140 с.

12. Горбачев В.Н., Попова Э.П. Особенности почвообразования на лессовидных суглинках в южной тайге Средней Сибири // Почвоведение. 1984. № 2. С. 15–21.

13. Корсунов В.М. Подзолистые почвы автономных ландшафтов средней тайги приенисейской части Западной Сибири // О почвах Сибири: К 11 Междунар. конгрессу почвоведов / Под ред. Р.В. Ковалева. Новосибирск: Наука, 1978. С. 122–131.

14. Корсунов В.М., Ведрова Э.Ф. Диагностика почвообразования в зональных лесных почвах. Новосибирск: Наука, 1982. 160 с.

15. Корсунов В.М., Ведрова Э.Ф., Красеха Е.Н. Почвенный покров таёжных ландшафтов Сибири. Новосибирск: Наука, 1988. 167 с.

16. О почвах Урала, Западной и Центральной Сибири. М.: АН СССР, 1962. 212 с.

17. Попова Э.П., Горбачев В.Н. Особенности формирования и свойства подстилок лесных биогеоценозов

Среднего Приангарья // Почвоведение. 1988. № 1. С. 109–116.

18. Chestnykh O.V., Zamolodchikov D.G. Bulk density of soil horizons as dependent on their humus content // Eurasian Soil Science. 2004. V. 37. P. 816–823.

19. Hiederer R., Kchy M. Global soil organic carbon estimates and the harmonized world soil database. EUR 25225 EN. Publications Office of the European Union, 2011. 79 p.

20. FAO, 2017. Soil Organic Carbon: the hidden potential. Food and Agriculture Organization of the United Nations Rome, Italy [Электронный ресурс] <http://www.fao.org/3/a-i6937e.pdf> (Дата обращения: 01.02.2022).

21. Lal R. Forest soils and carbon sequestration // Forest Ecology and Management. 2005. V. 220. P. 242–258.

22. IPCC, 2007. Climate Change 2007: Impacts, Adaptation and Vulnerability // Contribution of Working Group II to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change / Eds. M.L. Parry, O.F. Canziani, J.P. Palutikof, P.J. van der Linden, C.E. Hanson. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, 2007. 976 p.

23. Schepaschenko D.G., Shvidenko A.Z., Mukhortova L.V., Vedrova E.F. The pool of organic carbon in the soils of Russia // Eurasian Soil Science. 2013. V. 46. P. 107–116.

24. Kharuk V.I., Dvinskaya M.L., Petrov I.A., Im S.T., Ranson K.J. Larch forests of middle Siberia: long-term trends in fire return intervals // Regional Environmental Change. 2016. V. 16. No. 8. P. 2389–2397.

25. De Vos B., Cools N., Iivesniemi H., Vesterdal L., Vanguelova E., Carnicelli S. Benchmark values for forest soil carbon stocks in Europe: Results from a large scale forest soil survey // Geoderma. 2015. V. 251–252. P. 33–46.

26. Jobbágy E.G., Jackson R.B. The vertical distribution of soil organic carbon and its relation to climate and vegetation // Ecological Application. 2000. V. 10. No. 2. P. 423–436.

27. Chen H.Y.H., Shrestha B.M. Stand age, fire and clearcutting affect soil organic carbon and aggregation of mineral soils in boreal forest // Soil Biology and Biochemistry. 2012. V. 50. P. 149–157.

28. Дымов А.А., Низовцев Н.А. Амфифильные свойства почвенного органического вещества в парцеллах преобладающих хвойных деревьев средней тайги // Теоретическая и прикладная экология. 2015. № 1. С. 62–68.

References

1. Paradis L., Thiffault E., Achim A. Comparison of carbon balance and climate change mitigation potential of forest management strategies in the boreal forest of Quebec (Canada) // Forestry: An International Journal of Forest Research. 2019. V. 92. P. 264–277. doi: 10.1093/forestry/cpz004

2. Bradshaw C.J.A., Warkentin I.G. Global estimates of boreal forest carbon stocks and flux // Global and Planetary Change. 2015. V. 128. P. 24–30. doi: 10.1016/j.gloplacha.2015.02.004

3. Chernova O.V., Ryzhova I.M., Podvezennaya M.A. Assessment of organic carbon stocks in forest soils on a regional scale // Eurasian Soil Science. 2020. V. 53. P. 339–348. doi: 10.1134/S1064229320030023

4. Forest ecosystems of the Yenisey Meridian / Ed. F.I. Pleshokov. Novosibirsk: SO RAN, 2002. 356 p. (in Russian).

5. Bird M.I., Santrůcková H., Arneith A., Grigoriev S., Gleixner G., Kalaschnikov Y.N., Lloyd J., Schulze E.-D. Soil carbon inventories and carbon-13 on a latitude transect in Siberia // Tellus B: Chemical and Physical Meteorology. 2002. V. 54. P. 631–641. doi: 10.3402/tellusb.v54i5.16699

6. Czimczik C.I., Schmidt M.W.I., Schulze E.-D. Effects of increasing fire frequency on black carbon and organic matter in Podzols of Siberian Scots pine forests // European Journal of Soil Science. 2005. V. 56. P. 417–428. doi: 10.1111/j.1365-2389.2004.00665.x

7. Gavrikov V.L., Sharafutdinov R.A., Knorre A.A., Pakharkova N.V., Shabalina O.M., Bezkorovaynaya I.N., Borisova I.V., Erunova M.G., Khlebopros R.G. How much carbon can the Siberian boreal taiga store: a case study of partitioning among the above-ground and soil pools // Journal of Forest Research. 2016. V. 27. No. 4. P. 907–912. doi: 10.1007/s11676-015-0189-7

8. Osipov A.F., Bobkova K.S., Dymov A.A. Carbon stocks of soils under forest in the Komi Republic of Russia // Geoderma Regional. 2021. V. 27. Article No. e00427. doi: 10.1016/j.geodrs.2021.e00427

9. Classification and diagnostics of soils of the Russia / Ed. G.V. Dobrovolski. Smolensk: Ojkumena, 2004. 342 p. (in Russian).

10. Veredchenko Ju.P. Agrophysical characteristics of soils in the central part of the Krasnoyarsk region. Moskva: AN SSSR, 1961. 175 p. (in Russian).

11. Gorbachev V.N. Soils of the lower Angara region and the Yenisei ridge. Moskva: Nauka, 1967. 140 p. (in Russian).

12. Gorbachev V.N., Popova E.P. Features of soil formation on loess-like loams in the southern taiga of Central Siberia // Pochvovedenie. 1984. No. 2. P. 15–21 (in Russian).

13. Korsunov V.M. Podzolic soils of autonomous landscapes of the middle taiga in the Yenisei part of Western Siberia // About the soils of Siberia: K 11 Mezhdunar. kongressu pochvovedov / Ed. R.V. Kovalev. Novosibirsk: Nauka, 1978. P. 122–131 (in Russian).

14. Korsunov V.M., Vedrova E.F. Diagnostics of soil formation in zonal forest soils. Novosibirsk: Nauka, 1982. 160 p. (in Russian)

15. Korsunov V.M., Vedrova E.F., Kraseha E.N. Soil cover of the taiga landscapes of Siberia. Novosibirsk: Nauka, 1988. 167 p. (in Russian).

16. On the soils of the Urals, Western and Central Siberia. Moskva: AN SSSR, 1962. 212 p. (in Russian)

17. Popova E.P., Gorbachev V.N. Peculiarities of formation and properties of litters of forest biogeocenoses in the middle Angara Region // *Pochvovedenie*. 1988. No. 1. P. 109–116 (in Russian).
18. Chestnykh O.V., Zamolodchikov D.G. Bulk density of soil horizons as dependent on their humus content // *Eurasian Soil Science*. 2004. V. 37. P. 816–823.
19. Hiederer R., Kchy M. Global soil organic carbon estimates and the harmonized world soil database. EUR 25225 EN. Publications Office of the European Union, 2011. 79 p. doi: 10.2788/13267
20. FAO, 2017. Soil Organic Carbon: the hidden potential. Food and Agriculture Organization of the United Nations Rome, Italy [Internet resource] <http://www.fao.org/3/a-i6937e.pdf> (Accessed: 01.02.2022).
21. Lal R. Forest soils and carbon sequestration // *Forest Ecology and Management*. 2005. V. 220. P. 242–258. doi: 10.1016/j.foreco.2005.08.015
22. IPCC, 2007. Climate Change 2007: Impacts, Adaptation and Vulnerability // Contribution of Working Group II to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change / Eds. M.L. Parry, O.F. Canziani, J.P. Palutikof, P.J. van der Linden, C.E. Hanson. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, 2007. 976 p.
23. Schepaschenko D.G., Shvidenko A.Z., Mukhortova L.V., Vedrova E.F. The pool of organic carbon in the soils of Russia // *Eurasian Soil Science*. 2013. V. 46. P. 107–116. doi: 10.1134/S1064229313020129
24. Kharuk V.I., Dvinskaya M.L., Petrov I.A., Im S.T., Ranson K.J. Larch forests of middle Siberia: long-term trends in fire return intervals // *Regional Environmental Change*. 2016. V. 16. No. 8. P. 2389–2397. doi: 10.1007/s10113-016-0964-9
25. De Vos B., Cools N., Ilvesniemi H., Vesterdal L., Vanguelova E., Carnicelli S. Benchmark values for forest soil carbon stocks in Europe: Results from a large scale forest soil survey // *Geoderma*. 2015. V. 251–252. P. 33–46. doi: 10.1016/j.geoderma.2015.03.008
26. Jobbágy E.G., Jackson R.B. The vertical distribution of soil organic carbon and its relation to climate and vegetation // *Ecological Application*. 2000. V. 10. No. 2. P. 423–436. doi: 10.2307/2641104
27. Chen H.Y.H., Shrestha B.M. Stand age, fire and clearcutting affect soil organic carbon and aggregation of mineral soils in boreal forest // *Soil Biology and Biochemistry*. 2012. V. 50. P. 149–157. doi: 10.1016/j.soilbio.2012.03.014
28. Dymov A.A., Nizovtsev N.A. Amphiphilic properties of soil organic matter in parcels of predominant coniferous trees in the middle taiga // *Theoretical and Applied Ecology*. 2015. No. 1. P. 62–68 (in Russian). doi: 10.25750/1995-4301-2015-1-061-068

Аккумуляция полиаренов в высших растениях бугристых болот южной и северной тундры

© 2023. Е. В. Яковлева, к. б. н., н. с., Д. Н. Габов, к. б. н., с. н. с.,
Институт биологии Коми научного центра
Уральского отделения Российской академии наук,
167982, Россия, г. Сыктывкар, ул. Коммунистическая, д. 28,
e-mail: kaleeva@ib.komisc.ru

Проведены исследования содержания полициклических ароматических углеводородов (ПАУ) в высших растениях фоновых бугристых болот южной и северной тундры. Выявлено доминирование лёгких полиаренов в составе ПАУ всех исследованных растений. Установлено, что наибольшим содержанием ПАУ отличались растения южной тундры в 28 км к северо-западу от п. Воргашор, наименьшим – северной тундры в 100 км к северо-западу от данного посёлка. В болотных растениях южной тундры было выявлено повышенное содержание 2–3-ядерных полиаренов, обусловленное дальним переносом от Воркутинской промышленной агломерации. В растениях болот побережья Баренцева моря обнаружено повышение массовой доли тяжёлых ПАУ биопедогенного происхождения, которые аккумулировались растениями из болотных вод. Для осок и пушиц болот выявлено повышенное содержание бенз[к]флуорантена и бенз[а]пирена, связанное с активным корневым поглощением полиаренов, характерным для травянистых растений. Содержание полиаренов в растениях определялось как их видовыми особенностями, так и географическим положением болот. На основании проведённых исследований предложены фоновые концентрации ПАУ в разных видах болотных растений, которые могут быть использованы в целях мониторинга загрязнения ПАУ болотных экосистем севера.

Ключевые слова: полициклические ароматические углеводороды, южная тундра, северная тундра, растения, бугристые болота.

Accumulation of polyarenes in higher plants of hummock peatlands in the southern and northern tundra

© 2023. E. V. Yakovleva ORCID: 0000-0003-0793-1468, D. N. Gabov ORCID: 0000-0002-3786-9872
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: kaleeva@ib.komisc.ru

We studied the content of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) in plants of the background hummock peatlands in the southern (Vorkuta district, Komi Republic) and northern (Nenets Autonomous District) tundra. PAHs in plants were determined by high-performance liquid chromatography. We used ASE-350 Accelerated Solvent Extraction System (Dionex Corporation, USA) to extract PAHs from samples. Totally, 11 individual PAH structures were found in the plant samples studied. Low molecular weight PAHs were prevalent in all studied plants. The highest content of PAHs was found in plants at southern tundra (28 km northwest of the Vorgashor village); the lowest – at site in northern tundra (100 km northwest of the Vorgashor village). In the plants of the southern tundra, an increased content of 2–3-ring polyarenes was detected, that was possibly caused by long-distance transport from the Vorkuta industrial agglomeration. In plants from the Barents Sea coast, we revealed an increase in mass fraction of high molecular PAHs of biopedogenic origin, which were accumulated by plants from the peat waters. For sedges and cotton grasses, an increased content of benz[k]-fluoranthene and benz[a]pyrene has been detected. This fact may be associated with the active root uptake of polyarenes characteristic of herbaceous plants. The results of the cluster analysis showed that the polyarenes content of the plants was determined both by their species composition and by the geographical location of the study sites. The clustering of different plant species from different sites indicates the background concentrations of PAHs, which are maintained by plants under natural conditions without anthropogenic impact. Based on these studies, background concentrations of PAHs in different species of peatland plants have been proposed, which can be used for monitoring PAHs pollution in mire ecosystems of the north.

Keywords: polycyclic aromatic hydrocarbons, southern tundra, northern tundra, plants, hummock peatlands.

Полициклические ароматические углеводороды (ПАУ) – токсичные органические соединения бензольного ряда, которые могут иметь как биогенное, так и антропогенное происхождение. ПАУ принято делить на лёгкие 2–4-ядерные (нафталин, флуорен, фенантрен, антрацен, флуорантен, пирен, хризен, бенз[а]антрацен) и тяжёлые 5–6-ядерные (бензо[б]флуорантен, бензо[к]флуорантен, бенз[а]пирен). В настоящее время изучению содержания ПАУ в растениях естественных фоновых местообитаний уделяется недостаточное внимание. Исследования посвящены влиянию разного рода антропогенных источников на накопление ПАУ растениями [1–6]. Документально не установлены фоновые и предельно допустимые концентрации ПАУ в растениях.

Тундровые экосистемы, благодаря своим суровым условиям, являются наименее подверженными антропогенному воздействию. Развитие промышленности, определяющее локальное антропогенное воздействие на тундровые болота, в изучаемом регионе началось в 1930–1940-е гг. Исследования загрязнения ПАУ арктических регионов [7–9] показали, что ПАУ могут переноситься с атмосферными осадками даже в отдалённые районы, но их содержание минимально и соответствует фоновым уровням. Данные факты позволяют считать тундровые болота, удалённые от промышленных объектов, естественными фоновыми участками, а данные по содержанию ПАУ в болотных растениях можно использовать в качестве фоновых значений.

В высоких широтах бугристые болота занимают значительную часть поверхности суши и служат основными резервуарами углерода [10], поэтому являются наиболее интересными объектами для исследования. Основными источниками ПАУ в тундровых болотных растениях могут быть внутриклеточный синтез [11], аккумуляция из болотных вод (так как ПАУ в торфе малодоступны для растений) и атмосферных выпадений [1, 2]. Установлено, что ПАУ пассивно поглощаются растениями вместе с водой и питательными веществами [12].

Целью данной работы было выявить особенности накопления ПАУ в растениях естественных фоновых болот северной и южной тундры и предложить фоновые значения содержания ПАУ в болотных растениях для проведения мониторинговых исследований.

Объекты и методы исследования

Проведены исследования содержания ПАУ в болотных растениях естественных бугристых болот южной и северной тундры. Для каждой зоны растения отбирали на двух участках. Участок южной тундры 1 (ют1) расположен в 4,5 км к югу от оз. Лекъямботы в приозёрной депрессии на водоразделе малых рек Лекъямботывис и Нястишор, координаты: 67°42' с. ш., 63°24' в. д. Участок южной тундры 2 (ют2) расположен в 28 км к СЗ от п. Воргашор, 3,5 км к западу от оз. Лекъямботы, в бассейне р. Лекъямбо-Ты-Вис, координаты: 67°45' с. ш., 63°17' в. д. Участок северной тундры 1 (ст1) находится на побережье Баренцева моря (Ненецкий АО), координаты: 68°35' с. ш., 55°55' в. д. Участок северной тундры 2 локализован в НАО, к востоку от оз. Пуноты, в 100 км к северо-западу от п. Воргашор, его координаты: 68°17' с. ш., 62°23' в. д. С поверхности болот отбирали доминантные виды растений в трёхкратной повторности с участков 1 × 1 м. На участке ют1 отобраны виды: *Sphagnum riparium* Ångstr., *Sphagnum russowii* Warnst., *Eriophorum scheuchzeri* Hoppe, *Rubus chamaemorus* L., *Vaccinium uliginosum* L., *Betula nana* L. На участке ют2: *Sphagnum riparium*, *Eriophorum russeolum* Fries, *Carex aquatilis* L., *Ledum palustre* L., *Rubus chamaemorus*, *Betula nana*. На участке ст1: *Sphagnum lindbergii* Schimp., *Eriophorum russeolum*, *Carex aquatilis*, *Ledum decumbens* (Aiton) Lodd. ex Steud., *Rubus chamaemorus*, *Betula nana*. На участке ст2: *Sphagnum fuscum* (Schimp.) H. Klinggr., *Carex aquatilis*, *Ledum decumbens*, *Rubus chamaemorus*, *Vaccinium uliginosum*, *Betula nana*. У мхов и травянистых растений отбирали наземную и подземную часть, у кустарничков – листья, ветви и корни, у кустарников – листья, ветви, корни и стебли. Результаты усредняли с учётом массы отдельных органов и применяли на целое растение.

Химико-аналитические исследования выполняли в ЦКП «Хроматография» ИБ ФИЦ КНЦ УрО РАН. Определение ПАУ в растениях проводили методом высокоэффективной жидкостной хроматографии на жидкостном хроматографе «Люмахром». Методика определения ПАУ в растениях описана ранее [4]. Для исследованных выборок с помощью теста Колмогорова-Смирнова установлено нормальное распределение. Статистическую обработку проводили с помощью *t*-критерия Стьюдента при $P = 0,95$. На рисунках 1 и 3 приведены средние значения содержания ПАУ

в растениях, в качестве планок погрешностей использовали стандартные отклонения единичного значения. Для рисунка 1 усреднение проводили по зонам, для рисунка 3 усредняли все полученные данные для каждого вида растения. Для проведения кластерного анализа использовали программу Statistica-6. При построении дендрограммы сходства для объединения данных применяли метод Варда, в качестве способа определения сходства использовали Евклидово расстояние.

Результаты и обсуждение

В растениях болот южной и северной тундры обнаружено 11 структур ПАУ: нафталин, флуорен, фенантрен, антрацен, флуорантен, пирен, хризен, бенз[а]антрацен, бензо[б]-флуорантен, бензо[к]флуорантен, бенз[а]-пирен. В растениях доминировали лёгкие 2-4 ядерные ПАУ, их доля от общей суммы ПАУ варьировала от 95 до 99% (рис. 1). Преобладание низкомолекулярных структур ПАУ в растениях было отмечено многими авторами [3, 13–15]. Как правило, отсутствие 5- и 6-кольцевых ПАУ в растительном покрове указывает на отсутствие каких-либо региональных антропогенных источников выбросов этих соединений [13].

Следует отметить, что содержание ПАУ в растениях одного рода на всех исследуемых участках южной и северной тундры было близким. Для большинства растений, за исключением мхов родов *Sphagnum*, *Eriophorum* и *Carex aquatilis* различия в накоплении тяжёлых 5–6 ядерных структур для разных зон не значимы. Также минимальными были различия между накоплением ПАУ растениями разных видов одного рода.

Для рода *Sphagnum*, представленного в нашем исследовании несколькими видами, выявлены максимальные различия в накоплении ПАУ. При этом между *Sphagnum riparium* на разных участках северной тундры значимых различий в накоплении индивидуальных структур выявлено не было. Вероятно, разница в накоплении ПАУ для исследованных мхов во многом связана с видовыми особенностями. На накопление полиаренов могло влиять местообитание мхов: *S. fuscum* предпочитает олиготрофные местообитания [16], поэтому накопление ПАУ в нём было минимальным из всех представленных видов. *S. russowii* также является олиготрофом [17], но накопление ПАУ в нём было максимально. Такой факт мог быть обусловлен тем, что в олиготрофных условиях основным источником ПАУ для мхов служило атмосферное поступление, ко-

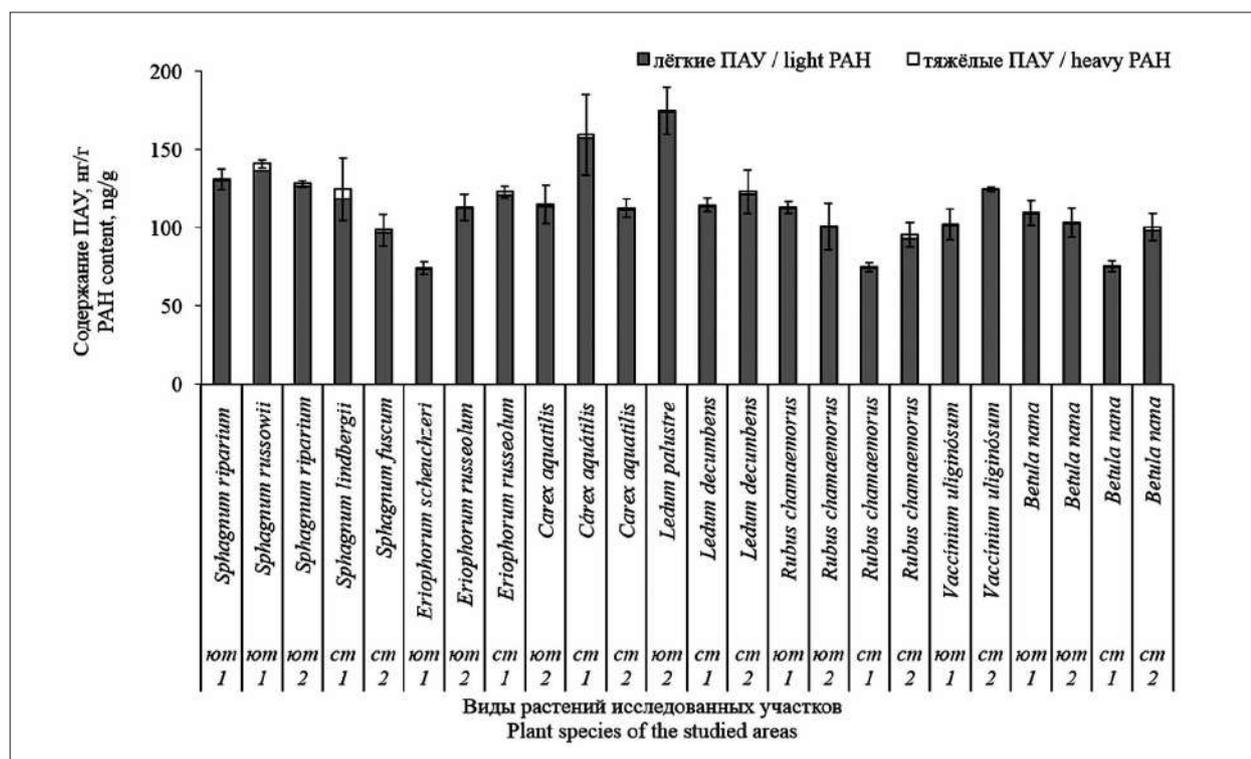


Рис. 1. Содержание ПАУ в болотных растениях южной и северной тундры (нг/г), где ют – южная тундра, ст – северная тундра, 1, 2 – номер участка
 Fig. 1. PAH content in bog plants of the southern and northern tundra (ng/g), where ют – southern tundra, ст – northern tundra, 1, 2 – site number

торое было больше в условиях южной тундры, наиболее приближённой к промышленным объектам, по сравнению с северной тундрой. Во мхах болот южной тундры выявлено повышенное содержание лёгких летучих ПАУ нафталина и фенантрена, по сравнению с северной. Мхи *Sphagnum riparium* и *S. lindbergii*, произрастающие во влажных условиях, могли активно поглощать ПАУ из болотных вод, что приводило к их сходному накоплению, для большинства индивидуальных структур различия в накоплении ПАУ данными видами в разных зонах были не значимы.

Для видов рода *Eriophorum* также можно проследить разные особенности накопления ПАУ. Аккумуляция полиаренов *E. russeolum* в южной и северной тундре происходила сходным образом, различия в накоплении были выявлены только для тяжёлых структур, которые активно накапливались растениями северной тундры (ст1). Повышенное накопление тяжёлых ПАУ было характерно и для *S. lindbergii* данного участка. Оно могло быть связано с особенностями расположения участка на побережье Баренцева моря. Ранее нами было выявлено повышенное содержание 5–6 ядерных ПАУ в верхних горизонтах торфяников побережья Баренцева моря по сравнению с данными слоями торфяников южной тундры [15]. *Eriophorum scheuchzeri* отличалась низким накоплением ПАУ, по-видимому, в силу видовых особенностей. Содержание индивидуальных ПАУ в ней значимо отличалось от *E. russeolum* северной тундры. Для двух участков южной тундры различия выявлены лишь для лёгких структур нафталина и флуорена, которых было несколько больше на участке ют2.

Образцы *Carex aquatilis* были отобраны на участках болот южной и северной тундры. Для большинства полиаренов различия в накоплении ПАУ в разных зонах были незначимы. Для осок болота побережья Баренцева моря выявлены значимые превышения содержания фенантрена, бенз[а]антрацена, бенз[к]-флуорантена и бенз[а]пирена по сравнению с участком южной тундры. Повышенные содержания тяжёлых ПАУ также были выявлены для *Eriophorum* и *Sphagnum*.

На болотах южной тундры был проанализирован *Ledum palustre*, на участках северной тундры – *L. decumbens*. Различия в накоплении индивидуальных полиаренов *L. palustre* и *L. decumbens* выявлены лишь для лёгких структур нафталина, флуорена и антрацена. Данный факт может быть связан с видовыми

особенностями *L. palustre*, характеризующегося большей способностью к аккумуляции ПАУ. Морфологически *L. decumbens* отличается от *L. palustre* очень узкими листьями и стелющимся расположением побегов, что могло ограничивать атмосферную аккумуляцию ПАУ. Кроме того, на накопление ПАУ могло повлиять расположение участков.

Rubus chamaemorus была отобрана на всех исследуемых участках, но при этом сходные закономерности накопления ПАУ в растениях данного вида выявлены лишь для флуорена, пирена, хризена и 5–6 ядерных структур. Растения участков южной тундры отличались повышенным содержанием нафталина и фенантрена. *Rubus chamaemorus* побережья Баренцева моря (ст1) содержала значительные количества флуорантена по сравнению с другими участками.

Также для всех исследованных участков было проанализировано содержание ПАУ в *Betula nana*. Значимые различия между кустарниками разных участков выявлены только для нафталина, хризена и бенз[а]антрацена. Для южной тундры были выявлены повышенные содержания нафталина и хризена. Для участка северной тундры (ст2) бенз[а]-антрацена.

Кустарнички *Vaccinium uliginosum* были отобраны только на участках ют1 и ст2. В целом аккумуляция ПАУ кустарничком в разных зонах была сходной, различия для большинства индивидуальных ПАУ не значимы. В южной тундре отмечены повышенные концентрации фенантрена (25 нг/г ют1, против 16 нг/г ст2), в северной – нафталина (95 нг/г для ст2 против 58 нг/г ют1) и бенз[а]-антрацена (0,3 нг/г для ст2 против 0 нг/г ют1). Так как для других болотных растений зоны северной тундры не характерны высокие концентрации нафталина, значительное накопление его в ветвях *V. uliginosum*, которыми определялся прирост нафталина, могло быть обусловлено аккумуляцией в течение длительного времени. Так как продолжительность жизни *V. uliginosum* до 90 лет, в южной тундре, вероятно, были отобраны более молодые растения, аккумуляция нафталина в которых происходила более короткое время.

Для *Carex aquatilis* и *Eriophorum* sp. выявлено повышенное содержание бенз[к]-флуорантена и бенз[а]пирена. Это может быть связано с активным корневым поглощением полиаренов характерным для травянистых растений [1, 2, 18]. Особенно накопление данных полиаренов характерно для участка

побережья Баренцева моря. Ранее в верхних слоях торфа исследованных участков побережья Баренцева моря были выявлены повышенные содержания бенз[к]флуорантена и бенз[а]пирена, которые могли поглощаться травянистыми растениями из болотных вод. Тяжёлые ПАУ в торфе участка ст1 имели биопедогенное происхождение, и образовывались в процессе поликонденсации молекул лигнина и деструкции гуминовых кислот и других высокомолекулярных органических соединений торфа [15, 19].

Выявлена тенденция более высокого содержания нафталина и фенантрена в растениях южной тундры по сравнению с северной, что, вероятно, связано с близостью промышленных объектов. В южной тундре более вероятно атмосферное поступление лёгких ПАУ от Воркутинского промышленного кластера находящиеся в 20 (ют1) и 30 км (ют2) от исследованных участков в южной тундре и в 100 км (ст2) и более (ст1) в северной тундре. Исследования льда и снежного покрова Баренцева моря установили отсутствие аэротехногенного привноса ПАУ на данной территории [7]. Согласно ранее полученным данным пик накопления ПАУ в почвах и растениях в зоне действия уголь-

ной шахты Воркутинская приходился на расстояние 500 м, в зоне действия Воркутинской ТЭС 1000 м [3, 4]. Данные подтверждаются и другими авторами – показано, что суммарное содержание ПАУ в почвах на расстоянии около 1000 м от предприятий электростанций снижались в 2 раза, наибольшей дальностью распространения характеризовались 2–3 ядерные ПАУ [5, 6]. Повышение массовой доли данных полиаренов мы наблюдали в ряде растений участков южной тундры. Установлено, что загрязнению тяжёлыми ПАУ (бенз[а]-пиреном) наиболее подвержены почвы и травянистые растения 5 км зоны на северо-запад от государственной районной электростанции, перемещение на дальние расстояния данного соединения не выявлено [1, 2], что также подтверждает полученные нами данные. В целом более высоким усреднённым содержанием полиаренов отличаются растения южной тундры участка 2, наименьшим – растения северной тундры участка 2.

Кластерный анализ не показал однозначных результатов (рис. 2), растения группировались как по принадлежности к одному участку отбора, как *Betula nana* и *Rubus chamaemorus*, *Ledum decumbens* и *Sphagnum*

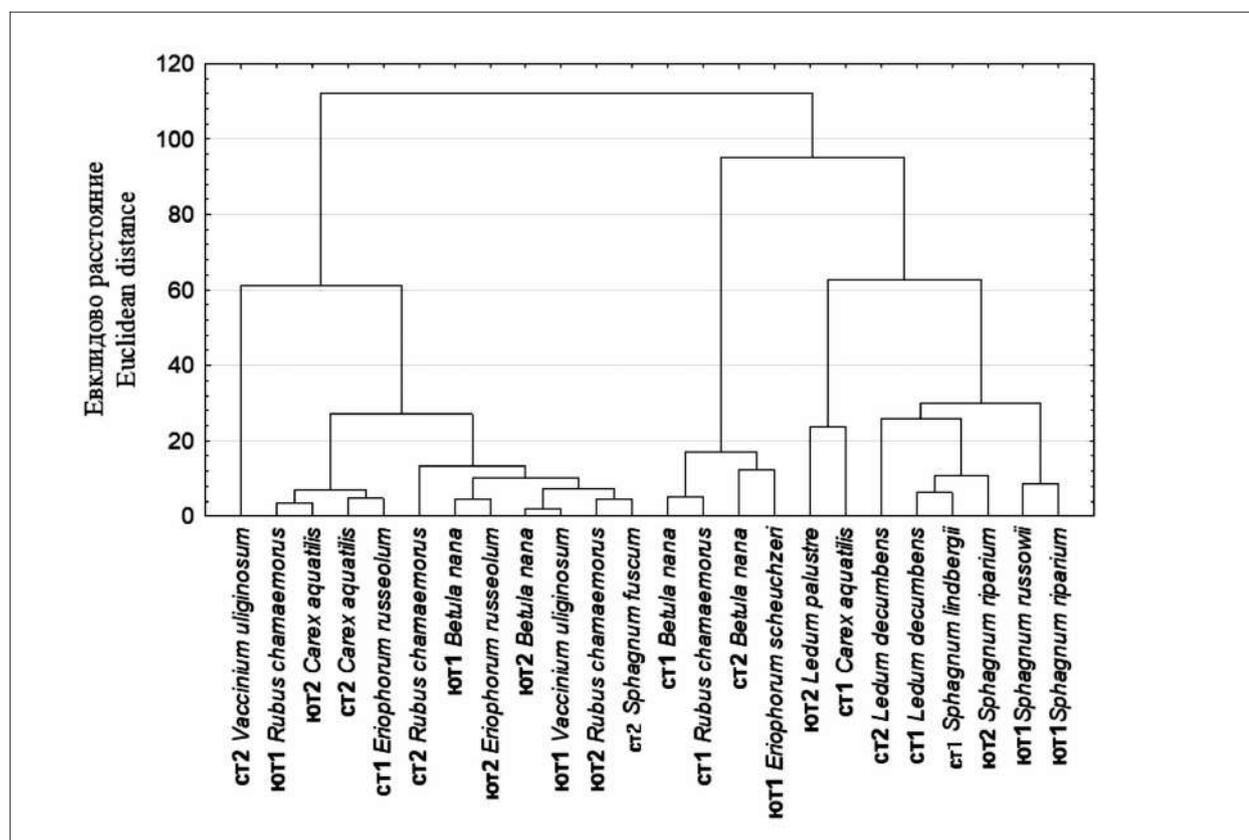


Рис. 2. Кластерный анализ содержания ПАУ в растениях разных зон
 Fig. 2. Cluster analysis of PAH content in plants from different zones

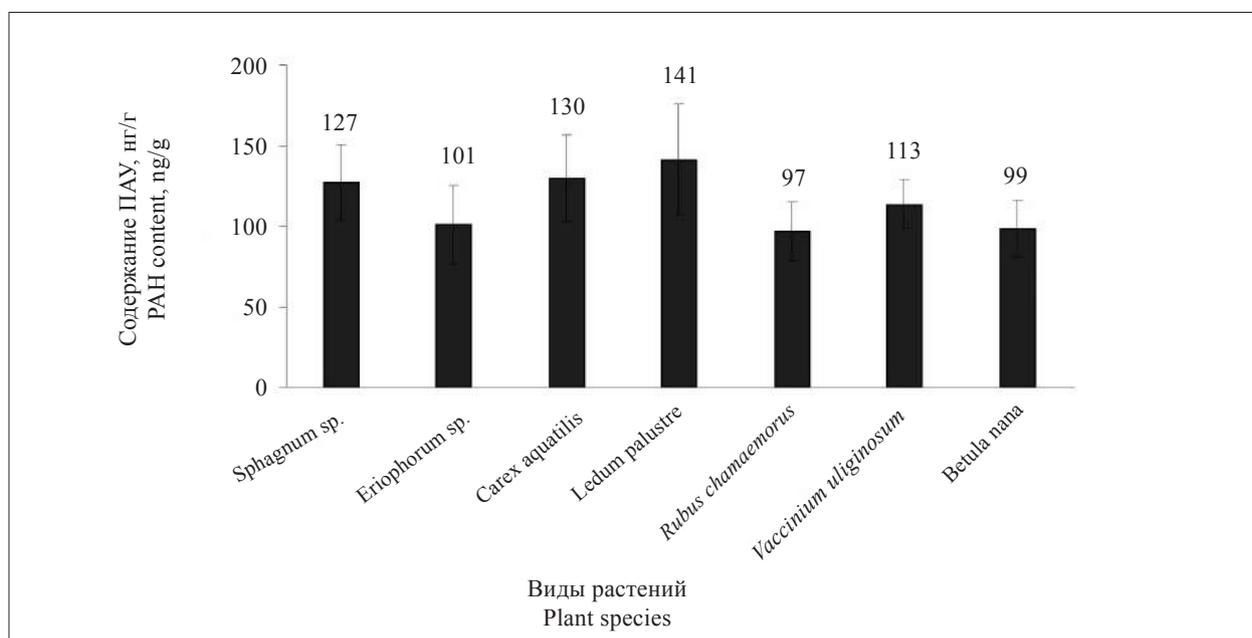


Рис. 3. Усреднённые значения содержания ПАУ в болотных растениях, нг/г
 Fig. 3. Average values of PAH content in bog plants, ng/g

lindbergii участка ст1; *Betula nana*, *Rubus chamaemorus*, *Eriophorum russeolum*, *Carex aquatilis* участка ют2; так и по схожести закономерностей накопления ПАУ растениями разных зон. В отдельную группу выделились мхи участков ют1, ют2 и ст1. Сходная аккумуляция характерна для видов рода *Ledum* разных участков. Растения *R. chamaemorus* участков ют 1, ют 2 и ст 2 также были объединены в один кластер.

Объединение в один кластер растений одного вида с разных участков также свидетельствует о существовании фоновых концентраций ПАУ, которые поддерживаются растениями в естественных условиях в отсутствии источников антропогенного воздействия.

К настоящему времени не существует аттестованной методики определения ПАУ в растениях. Для методики определения ПАУ в почве ПНД Ф 16.1:2.2:2.3:3.62-09 в исследованном нами диапазоне концентраций установлены погрешности около 50%. Растения являются более сложным объектом для анализа, поэтому погрешность определения для них не может быть значительно ниже. В нашем случае стандартное отклонение единичного значения при усреднении данных всех исследованных участков для каждого из исследованных видов растений не превышает 24% от среднего значения (рис. 3).

Исходя из этого, мы предполагаем, что для целей мониторинга можно усреднить по-

лученные нами данные по содержанию ПАУ для каждого из исследованных видов растений и использовать полученные значения в качестве фоновых для перечисленных видов растений других тундровых болот.

Заключение

Исследования накопления полиаренов растениями тундровых болот, в том числе с использованием статистических методов, показали, что аккумуляция ПАУ растениями определяется как видовыми особенностями, так и географическим (зональным) расположением участков произрастания. Обнаружено повышенное содержание лёгких 2–3-ядерных структур ПАУ в растениях болот южной тундры, что может быть обусловлено дальним переносом от Воркутинской промышленной агломерации. В целом состав ПАУ исследованных растений близок, отклонения в содержании для растений одного рода на разных исследованных участках не значимы. На основании проведённых исследований предложены усреднённые фоновые значения суммарного содержания ПАУ в болотных растениях разных видов, которые могут быть использованы в целях мониторинга загрязнения окружающей среды ПАУ.

Работа выполнена при финансовой поддержке государственной темы № 122040600023-8.

Литература

1. Sushkova S.N., Minkina T.M., Mandzhieva S.S., Tyurina I.G., Vasil'eva G.K., Kizilkaya R. Monitoring of benzo[a]pyrene content in soils affected by the long-term technogenic contamination // Eurasian Soil Science. 2017. V. 50. No. 1. P. 95–105.

2. Тюрина И.Г., Сушкова С.Н., Минкина Т.М., Назаренко О.Г., Манджиева С.С., Бауэр Т.В. Содержание бенз[а]пирена в естественной травянистой растительности зоны влияния Новочеркасской ГРЭС // Плодородие. 2015. № 6. С. 46–48.

3. Яковлева Е.В., Габов Д.Н. Накопление полиаренов в почвах и растениях южной тундры под действием процессов добычи и сжигания угля // Теоретическая и прикладная экология. 2020. № 2. С. 70–76.

4. Yakovleva E.V., Gabov D.N. Polyarenes accumulation in tundra ecosystem influenced by coal industry of Vorkuta // Polish Polar Research. 2020. V. 41. No. 3. P. 237–267.

5. Radic S., Meduni G., Kuhari Z., Roje V., Maldini K., Vujcic V., Krivohlavek A. The effect of hazardous pollutants from coal combustion activity: Phytotoxicity assessment of aqueous soil extracts // Chemosphere. 2018. V. 199. P. 191–200.

6. Cheng Q., Ge W., Chai C., Wu J., Ma D., Zeng L., Zhu X., Chen Q., Li J. Polycyclic aromatic hydrocarbons in soil around coal-fired power plants in Shandong, China // Pol. J. Environ. Stud. 2019. V. 28. No. 1. P. 53–64.

7. Nemirovskaya I.A., Novigatskii A.N. Hydrocarbons in the snow and ice cover and waters of the Arctic Ocean // Geochemistry International. 2003. V. 41. No. 6. P. 585–594.

8. AMAP Assessment 2016: Chemicals of Emerging Arctic Concern. Oslo, Norway: Narayana Press, Gylling, 2017. 354 p.

9. Masclet P., Hoyau V., Jaffrezo J.L., Cachier H. Polycyclic aromatic hydrocarbon deposition on the ice sheet of Greenland. Part I: Superficial snow // Atmospheric Environment. 2000. V. 34. No. 19. P. 3195–3207.

10. Пастухов А.В., Кноблаух К., Яковлева Е.В., Каверин Д.А. Маркеры трансформации органического вещества в мерзлотных бугристых болотах на европейском северо-востоке // Почвоведение. 2018. № 1. С. 48–61.

11. Krauss M., Wileke W., Martius Ch., Bandeira A.G., Garraia M.V.B., Amelung W. Atmospheric versus biological sources of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) in a tropical rain forest environment // Environ. Poll. 2005. V. 135. No. 1. P. 143–154.

12. Gao Y., Zhang Y., Liu J., Kong H. Metabolism and subcellular distribution of anthracene in tall fescue (*Festuca arundinacea* Schreb.) // Plant Soil. 2013. V. 365. P. 171–182.

13. Malawska M., Ekonomiuk A. The use of wetlands for the monitoring of non-point source air pollution // Polish Journal of Environmental Studies. 2008. V. 17. P. 57–70.

14. Wang Z., Li H., Liu S. Different distribution of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) between Sphagnum and Ledum peat from an ombrotrophic bog in Northeast China // Journal of Soils and Sediments. 2019. V. 19. P. 1735–1744.

15. Yakovleva E.V., Gabov D.N., Vasilevich R.S. Formation of the composition of polycyclic aromatic hydrocarbons in hummocky bogs in the forest tundra–northern tundra zonal sequence // Eurasian Soil Science. 2022. V. 55. No. 3. P. 313–329.

16. Гришуткин О.Г., Бойчук М.А., Гришуткина Г.А., Рукавишников В.В. Видовой состав и экология сфагновых мхов (Sphagnaceae) Республики Мордовия (Россия) // Nature Conservation Research. Заповедная наука. 2020. Т. 5. № 3. С. 114–133.

17. Зверев А.А., Бабешина Л.Г. Оценка условий местообитаний сфагновых мхов Западно-Сибирской равнины по ведущим экологическим факторам: объекты, материалы и методические основы // Вестник Томского государственного университета. 2009. № 325. С. 167–173.

18. Tian K., Bao H., Liu X., Wu F. Accumulation and distribution of PAHs in winter wheat from areas influenced by coal combustion in China // Environmental Science and Pollution Research. 2018. V. 25. P. 23780–23790.

19. Atanassova I., Brummer G.W. Polycyclic aromatic hydrocarbons of anthropogenic and biopedogenic origin in a colluviated hydromorphic soil of Western Europe // Geoderma. 2004. V. 120. P. 27–34.

References

1. Sushkova S.N., Minkina T.M., Mandzhieva S.S., Tyurina I.G., Vasil'eva G.K., Kizilkaya R. Monitoring of benzo[a]pyrene content in soils affected by the long-term technogenic contamination // Eurasian Soil Science. 2017. V. 50. No. 1. P. 95–105. doi: 10.1134/S1064229317010148

2. Tyurina I.G., Sushkova S.N., Minkina T.M., Nazarenko O.G., Mandzhieva S.S., Bauer T.V., Gimp A.V. Benzo[a]pyrene content in natural grassy vegetation in the affected zone of the novoчеркасск power station // Plodorodie. 2015. No. 6. P. 46–48 (in Russian).

3. Yakovleva E.V., Gabov D.N. Accumulation of polyarenes in soils and plants of the south tundra zone affected by coal mining and thermal power plant // Theoretical and Applied Ecology. 2020. No. 2. P. 70–76 (in Russian). doi: 10.25750/1995-4301-2020-2-070-076

4. Yakovleva E.V., Gabov D.N. Polyarenes accumulation in tundra ecosystem influenced by coal industry of Vorkuta // Polish Polar Research. 2020. V. 41. No. 3. P. 237–267. doi: 10.24425/ppr.2020.134122

5. Radic S., Meduni G., Kuhari Z., Roje V., Maldini K., Vujcic V., Krivohlavek A. The effect of hazardous pollutants from coal combustion activity: Phytotoxicity assessment of aqueous soil extracts // Chemosphere. 2018. V. 199. P. 191–200. doi: 10.1016/j.chemosphere.2018.02.008

6. Cheng Q., Ge W., Chai C., Wu J., Ma D., Zeng L., Zhu X., Chen Q., Li J. Polycyclic aromatic hydrocarbons in soil around coal-fired power plants in Shandong, China // *Pol. J. Environ. Stud.* 2019. V. 28. No. 1. P. 53–64. doi: 10.15244/pjoes/81686
7. Nemirovskaya I.A., Novigatskii A.N. Hydrocarbons in the snow and ice cover and waters of the Arctic Ocean // *Geochemistry International.* 2003. V. 41. No. 6. P. 585–594.
8. AMAP Assessment 2016: Chemicals of Emerging Arctic Concern. Oslo, Norway: Narayana Press, Gylling, 2017. 354 p.
9. Masclet P., Hoyau V., Jaffrezo J.L., Cachier H. Polycyclic aromatic hydrocarbon deposition on the ice sheet of Greenland. Part I: Superficial snow // *Atmospheric Environment.* 2000. V. 34. No. 19. P. 3195–3207. doi: 10.1016/S1352-2310(99)00196-x
10. Pastukhov A.V., Knoblauch C., Yakovleva E.V., Kaverin D.A. Markers of soil organic matter transformation in permafrost peat mounds of Northeastern Europe // *Eurasian Soil Science.* 2018. V. 51. No. 1. P. 42–53. doi: 10.7868/S0032180X18010057
11. Krauss M., Wilcke W., Martius Ch., Bandeira A.G., Garcia M.V.B., Amelung W. Atmospheric versus biological sources of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) in a tropical rain forest environment // *Environ. Poll.* 2005. V. 135. No. 1. P. 143–154.
12. Gao Y., Zhang Y., Liu J., Kong H. Metabolism and subcellular distribution of anthracene in tall fescue (*Festuca arundinacea* Schreb.) // *Plant Soil.* 2013. V. 365. P. 171–182. doi: 10.1007/s11104-012-1386-1
13. Malawska M., Ekonomiuk A. The use of wetlands for the monitoring of non-point source air pollution // *Polish Journal of Environmental Studies.* 2008. V. 17. P. 57–70.
14. Wang Z., Li H., Liu S. Different distribution of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) between *Sphagnum* and *Ledum* peat from an ombrotrophic bog in Northeast China // *Journal of Soils and Sediments.* 2019. V. 19. P. 1735–1744. doi: 10.1007/s11368-018-2178-x
15. Yakovleva E.V., Gabov D.N., Vasilevich R.S. Formation of the composition of polycyclic aromatic hydrocarbons in hummocky bogs in the forest tundra – northern tundra zonal sequence // *Eurasian Soil Science.* 2022. V. 55. No. 3. P. 313–329. doi: 10.1134/S1064229322030140
16. Grishutkin O.G., Boychuk M.A., Grishutkina G.A., Rukavishnikova V.V. Check-list and ecology of sphagnum mosses (Sphagnaceae) in the Republic of Mordovia // *Nature Conservation Research.* 2020. V. 5. No. 3. P. 114–133 (in Russian). doi: 10.24189/ncr.2020.038
17. Zverev A.A., Babeshina L.G. The estimate of the conditions of habitats of sphagnum mosses in West Siberian plain by the key environmental factors: objects, data and methodical basis // *Tomsk State University Journal.* 2009. No. 325. P. 167–173 (in Russian).
18. Tian K., Bao H., Liu X., Wu F. Accumulation and distribution of PAHs in winter wheat from areas influenced by coal combustion in China // *Environmental Science and Pollution Research.* 2018. V. 25. P. 23780–23790. doi: 10.1007/s11356-018-2456-6
19. Atanassova I., Brummer G.W. Polycyclic aromatic hydrocarbons of anthropogenic and biopedogenic origin in a colluviated hydromorphic soil of Western Europe // *Geoderma.* 2004. V. 120. P. 27–34. doi: 10.1016/j.geoderma.2003.08.007

Статистический анализ взаимосвязи накопления тяжёлых металлов и биохимических реакций растений в условиях городской среды

© 2023. А. С. Петухов, ассистент, Т. А. Кремлева, д. х. н., директор, Н. А. Хритохин, к. х. н., профессор, Г. А. Петухова, д. б. н., профессор, Тюменский государственный университет, 625003, Россия, г. Тюмень, ул. Володарского, д. 6, e-mail: revo251@mail.ru

Работа посвящена изучению влияния аккумуляции тяжёлых металлов (ТМ) (Cu, Zn, Fe, Mn, Pb, Cd, Ni, Co, Cr) в почвах и листьях мать-и-мачехи из техногенных зон г. Тюмени на биохимические показатели растений. Регрессионный и факторный анализ проведён на массиве данных по содержанию ТМ в растениях мать-и-мачехи, в почве, а также биохимическим показателям растений (содержание пигментов фотосинтеза, продуктов перекисного окисления липидов, фенолов, флавоноидов, активность каталазы, пероксидазы). Материал для исследований отобран в 2017–2020 гг. в г. Тюмени в районах с различной антропогенной нагрузкой ($n = 28$). Регрессионный анализ позволил выявить уравнения, связывающие содержание пигментов фотосинтеза в растениях с уровнем Cu, Fe, Mn и Zn в почвах. Установлены регрессионные зависимости между содержанием Fe, Zn и Cu в растениях и почвах. Обнаружена обратная взаимосвязь между уровнем фенольных антиоксидантов и содержанием Cu и Mn в растениях. Содержание пигментов фотосинтеза оказалось наиболее важным биохимическим показателем адаптации растений к накоплению ТМ, что, вероятно, обусловлено повышенной потребностью растений в энергии в условиях загрязнения. Накопление Pb растениями оказало наибольшее влияние на изменение биохимического статуса среди всех изученных ТМ. Содержание Cd и Pb в почве в наибольшей степени обуславливает стресс растений, вызванный загрязнением почвы ТМ.

Ключевые слова: тяжёлые металлы, почвы, растения, фотосинтез, антиоксиданты, городская среда.

Statistical analysis of the relationship between heavy metal accumulation and plants biochemical responses in the urban area

© 2023. A. S. Petukhov ORCID: 0000-0003-2906-174X²
T. A. Kremleva ORCID: 0000-0002-8157-8677²
N. A. Khritokhin ORCID: 0000-0003-0580-2283²
G. A. Petukhova ORCID: 0000-0001-9229-4912²
University of Tyumen,
6, Volodarskogo St., Tyumen, Russia, 625003,
e-mail: revo251@mail.ru

This study is devoted to heavy metal accumulation (Cu, Zn, Fe, Mn, Pb, Cd, Ni, Co, Cr) in soils and coltsfoot leaves from the industrial area of Tyumen impact on biochemical parameters of plants. Regression and factor analysis were conducted using data of heavy metal concentration in coltsfoot, heavy metals mobile and acid-soluble fraction in soils, and biochemical parameters (concentration of photosynthetic pigments, lipid peroxidation products, phenols, flavonoids, activity of catalase and peroxidase). Samples were collected during 2017–2020 in Tyumen at areas with different pollution level ($n = 28$). Regression analysis established equations linking photosynthetic pigments content with Cu, Fe, Mn, and Zn concentration in soils and coltsfoot. Phenolic antioxidants negatively correlate with Cu and Mn content in plants. Regression equations allow predicting Fe, Zn, and Cu concentration in coltsfoot by its content in the soil. Factor analysis revealed photosynthetic pigments to be the most important biochemical parameter in plants adaption to heavy metal accumulation. Probably, this is due to plants' elevated need in energy in polluted conditions. According to factor analysis, Pb accumulation in plants contributes the most to the biochemical change. Cd and Pb concentration in soil mostly conditions plants stress from heavy metal soil pollution.

Keywords: heavy metals, soils, plants, photosynthesis, antioxidants, urban area.

Загрязнение окружающей среды тяжёлыми металлами (ТМ) является острой экологической проблемой [1]. Поступление ТМ из загрязнённой почвы в растения подавляет их рост и развитие, ограничивает использование территории для выращивания сельскохозяйственных культур [2]. Аккумуляция ТМ в растениях сопровождается рядом биохимических изменений. Cu, Zn, Fe, Mn участвуют в процессах фотосинтеза и дыхания, входят в состав активных центров многих ферментов, регулируют белковый и углеводный обмен [3]. В то же время, избыточное содержание ТМ подавляет активность фотосинтетической системы, вызывает окислительные процессы в клетках, нарушает проницаемость клеточных мембран [4]. Сродство ТМ к различным функциональным группам в биомолекулах приводит к снижению активности ферментов и повреждению структуры антиоксидантов [5].

Биохимический статус растений в условиях загрязнения городской среды ТМ остаётся малоизученным [6–8]. Система «почва–растение» является сложной и зависит от многих внешних и внутренних факторов. Статистические методы анализа позволяют выявлять закономерности в изменении биохимического статуса растений под воздействием накопления ТМ в почве и растениях. Исследование изменений биохимических показателей растений при аккумуляции ТМ позволит с одной стороны установить металлы, влияющие на жизнедеятельность растений в большей степени, а с другой – выявить наиболее важные биохимические показатели для выживания и адаптации растений в условиях загрязнения.

Тюмень является одним из городов России с наибольшей обеспеченностью населения автомобильным транспортом. Кроме того, на территории города находятся аккумуляторный, моторостроительный, нефтеперерабатывающий, металлургические заводы и другие предприятия, что также создаёт потенциальную опасность для загрязнения почв тяжёлыми металлами. Содержание ТМ в почвах г. Тюмени и Тюменского района было ранее проанализировано в других работах [9–12]. Тем не менее особенности аккумуляции ТМ в растениях г. Тюмени не исследованы.

Мать-и-мачеха является растением с широко признанными лекарственными свойствами. Листья мать-и-мачехи обладают отхаркивающим, противовоспалительным, дезинфицирующим и потогонным действием [13]. Мать-и-мачеха включена в фармакопей

15 стран [14]. В то же время изучение особенностей химического состава этого растения, в том числе содержания ТМ, является недостаточным [13].

Целью работы стало установление влияния аккумуляции тяжёлых металлов (Cu, Zn, Fe, Mn, Pb, Cd, Ni, Co, Cr) в почвах и растениях мать-и-мачехи из техногенных зон г. Тюмени на биохимические показатели растений с помощью многомерных статистических методов.

Объекты и методы исследования

Материалом для проведения статистического анализа стали результаты химического анализа содержания ТМ в почвах и в растениях мать-и-мачехи, а также данные по биохимическим показателям растений, полученные в 2017–2020 гг. Результаты химического анализа были опубликованы в ряде работ авторского коллектива [15–17]. Материал для исследования был отобран в г. Тюмени в районах с различной антропогенной нагрузкой (рис.): 1. Контроль – участок на удалении 5 км от антропогенных источников. 2. Автотрасса Тюмень – Омск – 30 км от г. Тюмени, удаление от автотрассы не более 30 м. 3. Тюменские Моторостроители – г. Тюмень, участок на удалении 200 м. 4. НПЗ – г. Тюмень, участок на удалении 200 м от Антипинского нефтеперерабатывающего завода. 5. Район Аккумуляторного завода, г. Тюмень, участок на удалении 200 м. 6. УГМК (Уральская горно-металлургическая компания) – г. Тюмень, участок на удалении 200 м к югу, вблизи автотрассы. 7. УГМК 2 – участок на удалении 50 м. 8. УГМК 3 – участок на удалении 2 км к востоку, вблизи автотрассы. 9. УГМК 4 – участок на удалении 500 м к северу.

Пробы на участке № 7 отбирали в 2017–2018 гг., а на участках – № 8–9 в 2018 г.

В матрицу для проведения анализа были включены данные по содержанию в почве подвижных и кислоторастворимых форм ТМ, результаты определения содержания ТМ в надземной части (листья и стебли) мать-и-мачехи и биохимические показатели: содержание пигментов фотосинтеза (хлорофилл *a*, *b*, каротиноиды), продуктов перекисного окисления липидов (основания Шиффа, диеновые конъюгаты), фенолов, флавоноидов, активность каталазы и пероксидазы. В связи с тем, что содержание Pb и Cd в 2017–2019 гг. в некоторых пробах почв и растений было ниже предела определения, результаты за этот

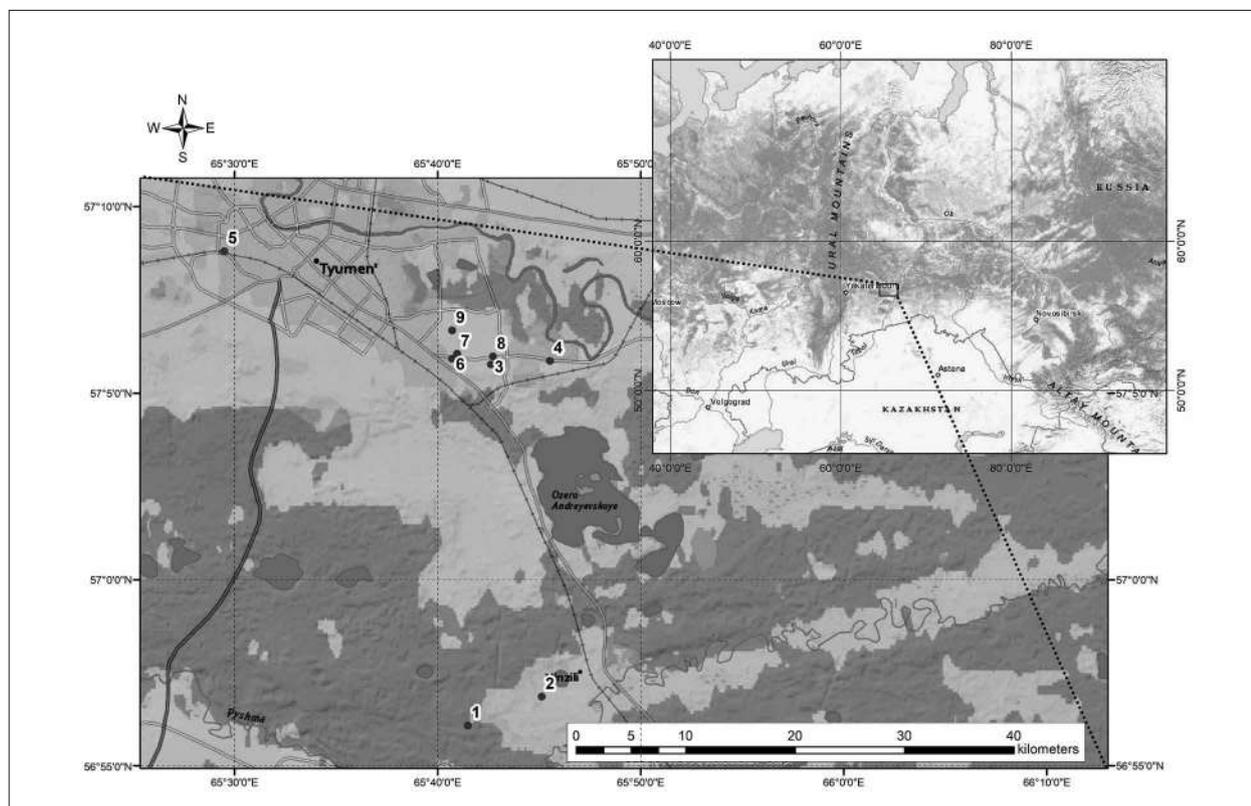


Рис. Карта района отбора проб почв и растений в г. Тюмени
 Fig. Sampling map of soils and plants in Tyumen

период не учитывали. Содержание Ni, Co, Cr и активность пероксидазы исследовали только в эксперименте 2020 г. Всего для составления матрицы использовано более 30 показателей для 28 проб почв и растений.

Анализ содержания металлов (Cu, Zn, Fe, Mn, Pb, Cd, Ni, Co, Cr) проводили на оборудовании Центра коллективного пользования ТюмГУ «Рациональное природопользование и физико-химические исследования» на атомно-абсорбционном ContrAA 700 и атомно-эмиссионном спектрофотометре с индуктивно-связанной плазмой PlasmaQuant PQ 9000. Исследование содержания пигментов фотосинтеза [18], продуктов перекисного окисления липидов [19], флавоноидов [20], активность каталазы [21] и пероксидазы [20] проводили спектрофотометрически. Содержание растительных фенолов определяли титрованием согласно общей фармакопейной статье 1.5.3.0008.15.

Линейный регрессионный и факторный анализ полученных результатов проведён в программе Statistica 12. В факторном анализе для каждого показателя были просуммированы только статистически значимые ($p \leq 0,05$) значения факторных нагрузок (x_i), взятые по модулю, и с учётом доли от общей дисперсии,

объясняемой данным фактором (S_i/S_1). Сумма полученных коэффициентов была отнесена к теоретически максимально возможной сумме (N), на основании этого все изученные показатели были ранжированы по статистической значимости:

$$P = \frac{\sum_{i=1}^3 \left(|x_i| \cdot \frac{S_i}{S_1} \right)}{N} \cdot 100\%,$$

где x_i – статистическая значимая ($p \leq 0,05$) нагрузка i -го фактора, S_i – процент общей дисперсии, объясняемой фактором, N – максимальная теоретически возможная сумма (при условии $x_i = 1$ и $S_i/S_1 = 1$), P – статистическая значимость показателя по результатам факторного анализа.

В уравнении символом S_1 обозначены две разных величины – общая дисперсия и дисперсия 1-го фактора.

Результаты и обсуждение

Результаты химического анализа содержания ТМ в почвах и в растениях мать-и-мачехи, а также результаты анализа биохимических показателей были ранее опубликованы в

работах [15–17]. Накопление ТМ в почвах г. Тюмени относительно контрольного участка убывало в ряду: $Pb > Cu > Zn > Ni > Cr > Fe > Co > Mn > Cd$. Аккумуляция изученных ТМ в растениях г. Тюмени относительно контрольного участка убывала в ряду $Fe > Zn = Mn > Pb > Cu > Cr > Co > Ni > Cd$. Однако транслокация ТМ (отношение содержания в растении к содержанию в почве) уменьшалась в ряду: $Cu > Zn > Cd > Pb > Ni > Mn > Cr > Co > Fe$. Полученный результат обусловлен различной подвижностью ТМ в почвах и потребностью растений в поглощении элементов из почвы.

Содержание пигментов фотосинтеза в листьях мать-и-мачехи из городской среды снижалось по сравнению с контрольным районом во все годы исследования, за исключением 2019 г. Содержание продуктов перекисного окисления липидов (ПОЛ), характеризующих уровень стресса организма, было снижено или оставалось на уровне контроля. Содержание фенольных антиоксидантов (растительных фенолов и флавоноидов) в мать-и-мачехе из городской среды в 2017 г. было выше по сравнению с контролем. Однако в 2018–2020 гг. содержание этих антиоксидантов было ниже в 1,1–6,5 раза. В 2020 г. активность пероксидазы в мать-и-мачехе из городской среды была снижена на 10–50% на всех исследованных участках. Характер изменения активности каталазы в листьях мать-и-мачехи был неоднозначен, в зависимости от года и района исследования наблюдались как активация фермента, так и подавление его активности. Выявление взаимосвязи между содержанием ТМ в почве и растениях простым обзорным анализом невозможно, тенденции могут быть обусловлены разными факторами и зачастую противоречивы. Метод регрессионного анализа позволяет сравнить эти тенденции и выявить наиболее значимые и достоверные. Результаты регрессионного анализа представлены в таблице 1 в виде уравнений, связывающих пары: содержание металла в почве или растении – биохимический показатель. Результаты регрессионного анализа позволили ранжировать эти связи по уровню значимости и коэффициенту корреляции.

Регрессионный анализ выявил ряд зависимостей между содержанием ТМ в почвах и концентрацией пигментов фотосинтеза в тканях растений (уравнения № 1, 3–8, 10, 16). Содержание хлорофилла *a*, *b* и каротиноидов находилось в прямой взаимосвязи с содержанием подвижной формы Fe в почве ($R = 0,51; 0,54; 0,43; p < 0,01$). Железо явля-

ется необходимым элементом для протекания фотосинтеза. Считается, что 90% железа в растительных клетках находится в хлоропластах [22], а цитохромы участвуют в переносе электронов при фотосинтезе. Кроме того, содержание хлорофиллов *a* и *b* находилось в прямой взаимосвязи с подвижной формой Cu в почве (уравнения № 3, 7, $R = 0,52; 0,47$). Подвижная форма ТМ в почве считается наиболее доступной для растений, а медь входит в состав пластоцианинов – белков-переносчиков электронов от фотосистемы II к фотосистеме I [23].

Содержание пигментов фотосинтеза находилось в обратной взаимосвязи с уровнем Mn в почве (уравнения № 5, 8, 10, $R = -0,50; -0,46; -0,45$), что может быть связано с подавлением активности биосинтеза хлорофилла в связи со стрессом от загрязнения. Регрессионные зависимости между содержанием пигментов фотосинтеза и уровнем ТМ в почвах позволяют косвенно прогнозировать степень превращения CO_2 в биомассу в условиях загрязнения городской среды ТМ.

Содержание каротиноидов в листьях находилось в прямой взаимосвязи с уровнем Cu в растениях (уравнение № 16, $R = 0,38$). Кроме того, концентрация хлорофилла *b* в растениях находилось в обратной взаимосвязи с содержанием Zn (уравнение № 12, $R = -0,44$), что может быть обусловлено вытеснением Mg из порфиринового комплекса за счёт близости ионных радиусов Mg^{2+} (0,72 Å) и Zn^{2+} (0,74 Å) [24].

Содержание фенольных антиоксидантов находилось в обратной взаимосвязи с содержанием Cu и Mn в растениях ($R = -0,53; -0,40; p \leq 0,03$). Вероятно, это объясняется расходом растительных фенолов на хелатирование ТМ в клетках [5]. Содержание флавоноидов также находилось в отрицательной корреляции с содержанием кислоторастворимой формы Cu в почве (уравнение № 9, $R = -0,45$).

Полученные уравнения линейной регрессии позволяют прогнозировать содержание Fe, Cu, Zn в растениях мать-и-мачехи по концентрации подвижной формы этих металлов в почвах (уравнения № 11, 13, 14). Коэффициент наклона регрессионной функции показывает склонность растения к аккумуляции металла при возрастании его содержания в почве (максимален для Fe и минимален для Zn).

Благодаря факторному анализу составлен ряд изученных биохимических показателей растений по значимости их изменения в условиях загрязнения ТМ (табл. 2, 3). Полу-

Таблица 1 / Table 1

Результаты анализа линейного регрессионного анализа для мать-и-мачехи, 2017–2020 гг. ($n = 28$)
The results of linear regression analysis for coltsfoot, 2017–2020 ($n = 28$)

№	Показатели ($x - y$) Parameters ($x - y$)	Уравнение линейной регрессии Linear regression equation	Коэффициент корреляции R Correlation coefficient R	Уровень статической значимости p p -value
1	Fe подви. – Хлорофилл b Fe mobile – Chlorophyll b	$y = 0,52x + 271$	0,536	0,003
2	Cu – Фенолы Cu – Phenols	$y = -0,29x + 12,0$	-0,533	0,003
3	Cu подви. – Хлорофилл a Cu mobile – Chlorophyll a	$y = 97,4x + 174$	0,518	0,005
4	Fe подви. – Хлорофилл a Fe mobile – Chlorophyll a	$y = 0,43x + 192$	0,509	0,006
5	Mn кисл. – Хлорофилл b Mn acid – Chlorophyll b	$y = -0,17x + 371$	-0,496	0,007
6	Fe подви. – Каротиноиды Fe mobile – Carotenoids	$y = 0,35x + 162$	0,494	0,008
7	Cu подви. – Хлорофилл b Cu mobile – Chlorophyll b	$y = 102x + 256$	0,474	0,01
8	Mn кисл. – Хлорофилл a Mn acid – Chlorophyll a	$y = -0,14x + 274$	-0,462	0,01
9	Cu кисл. – Флавоноиды Cu acid – Flavonoids	$y = -0,069x + 3,27$	-0,451	0,02
10	Mn кисл. – Каротиноиды Mn acid – Carotenoids	$y = -0,11x + 227$	-0,450	0,02
11	Fe подви. – Fe Fe mobile – Fe	$y = 19,8x + 685$	0,441	0,02
12	Zn – Хлорофилл b Zn – Chlorophyll b	$y = -0,78x + 334$	-0,436	0,02
13	Cu подви. – Cu Cu mobile – Cu	$y = 9,69x + 8,42$	0,430	0,02
14	Zn подви. – Zn Zn mobile – Zn	$y = 0,042x + 2,16$	0,405	0,03
15	Mn – Фенолы Mn – Phenols	$y = -0,020x + 9,54$	-0,403	0,03
16	Cu – Каротиноиды Cu – Carotenoids	$y = 2,61x + 149$	0,376	0,05

чен следующий ряд: хлорофилл b = фенолы > хлорофилл a = каротиноиды > диеновые конъюгаты > основания Шиффа > флавоноиды > каталаза > пероксидаза.

Наиболее значимым показателем, изменяющимся при загрязнении почвы ТМ, оказалось содержание пигментов фотосинтеза (хлорофилл a , каротиноиды, хлорофилл b). Фотосинтетическая система растений может являться мишенью для ТМ. Тяжёлые металлы способны нарушать цепь транспорта электронов при фотосинтезе, связываться с фотосинтетическими мембранами и ферментами, нарушая их функционирование [4]. Снижение получаемой растениями в результате фотосинтеза энергии ослабляет их способ-

ность синтезировать органические вещества, активировать антиоксидантные системы и фитохелатины.

С другой стороны, металлсодержащие комплексы (пластоцианины (Cu), цитохромы (Fe)) способствуют переносу электронов в ходе фотосинтеза [22, 23]. Стимулирующее воздействие ТМ на процесс фотосинтеза позволяет растениям справляться со стрессом при накоплении более токсичных металлов (Pb, Cd), что, вероятно, является наиболее значимым фактором при аккумуляции ТМ в клетках.

Среди изученных антиоксидантов изменение содержания фенолов оказалось наиболее значимым. Вероятно, это обусловлено двойной

Таблица 2 / Table 2

Результаты факторного анализа экспериментов 2017–2019 гг.
The results of factor analysis in 2017–2019

Показатель Parameter	2017			2018			2019		
	фактор 1 factor 1	фактор 2 factor 2	фактор 3 factor 3	фактор 1 factor 1	фактор 2 factor 2	фактор 3 factor 3	фактор 1 factor 1	фактор 2 factor 2	фактор 3 factor 3
Cu	0,86	0,06	-0,46	-0,02	-0,49	-0,26	0,35	-0,56	-0,69
Mn	-0,50	0,37	-0,50	-0,41	-0,09	-0,53	0,76	0,55	-0,31
Fe	-0,83	0,36	0,08	-0,36	0,72	-0,46	0,70	0,64	-0,25
Zn	0,32	-0,40	-0,62	-0,68	0,38	-0,38	-0,15	0,38	-0,82
Cu почва Cu soil	0,01 -0,69	-0,64 -0,64	-0,71 0,14	0,52 0,58	-0,46 0,70	0,53 -0,01	-0,25 0,77	0,73 -0,57	0,51 0,15
Mn почва Mn soil	-0,54 -0,80	-0,36 -0,48	0,75 0,10	-0,14 0,37	0,76 0,26	-0,34 -0,35	0,88 0,83	-0,12 0,02	-0,36 0,23
Fe почва Fe soil	0,81 -0,81	0,24 -0,39	0,42 0,12	0,55 0,13	0,07 0,72	-0,60 0,30	-0,32 0,72	0,64 -0,56	-0,31 0,40
Zn почва Zn soil	-0,20 -0,69	-0,63 -0,71	-0,07 0,09	0,42 0,57	0,87 0,77	-0,44 -0,25	0,81 0,90	0,40 -0,40	-0,37 0,08
Хлорофилл a Chlorophyll a	0,95	-0,17	0,20	0,83	-0,37	-0,08	0,92	0,32	0,05
Хлорофилл b Chlorophyll b	0,83	-0,09	0,42	0,87	-0,14	0,00	0,98	0,16	-0,04
Каротиноиды Carotenoids	0,92	-0,19	0,24	0,84	-0,32	-0,07	0,93	0,28	0,11
Основания Шиффа Schiff bases	0,68	-0,54	0,30	0,73	0,07	-0,26	0,69	0,52	0,12
Диеновые конъюгаты Conjugated dienes	0,76	-0,06	0,16	0,70	0,04	0,02	0,31	0,66	0,47
Фенолы Phenols	-0,87	0,42	0,21	0,21	0,73	-0,30	-0,90	-0,14	-0,31
Флавоноиды Flavonoids	-0,26	0,88	-0,34	-0,16	0,38	0,29	-0,67	0,64	-0,34
Каталаза Catalase	-0,30	0,61	0,60	0,38	-0,28	-0,26	-0,52	0,44	0,67
Объясняемая дисперсия, % Dispersion explained, %	47	22	15	29	26	16	51	23	15

Примечание: жирным шрифтом выделены статистически значимые ($p \leq 0,05$) значения факторных нагрузок. Для содержания тяжёлых металлов в почвах приведены факторные нагрузки по содержанию подвижной формы (верхняя строка) и кислоторастворимой формы (нижняя строка).

Note: statistically significant ($p \leq 0.05$) factor loadings are in bold. Factor loadings for heavy metals in soils are separate for mobile form (first line) and acid-soluble form (second line).

функцией этих соединений: обрыв цепей свободнорадикального окисления и хелатирование ионов металлов [25]. Наименее значимым показателем оказалась активность пероксидазы. Пероксидаза утилизирует токсичную перекись водорода в клетках и обладает более высоким сродством к субстрату по сравнению с каталазой [26]. По результатам факторного анализа изменение активности каталазы было

более значимым, по сравнению с пероксидазой, что, вероятно, свидетельствует о более высоких концентрациях перекиси в клетках.

Факторный анализ позволил ранжировать металлы в растениях по их значимости влияния на биохимические показатели. Был получен следующий ряд: Cd > Pb > Fe > Ni > Co > Cr > Mn > Cu > Zn. Среди всех изученных металлов Cd оказывает наибольшее влияние

на изменение биохимического статуса растений. Несмотря на низкое, по сравнению с другими металлами, содержание в почвах и растениях, **Pb и Cd обладают наиболее высокой токсичностью** [2]. В первую очередь, это достигается за счёт высокого сродства Pb и Cd к S- и N-содержащим лигандам [24]. Железо обладает высокой окислительно-восстановительной подвижностью, поэтому может напрямую участвовать в различных биохимических процессах: в цепи дыхания, фотосинтеза, катализировать функциониро-

вание ферментных процессов [22, 27]. Кроме того, среди всех ТМ растения мать-и-мачехи аккумулировали Fe в наибольшей степени, что обуславливает его высокое положение в полученном ряду.

Важно учитывать не только стресс от накопления ТМ непосредственно в растениях, но и от нахождения поллютантов в почве и ризосфере. Свинец и кадмий занимают первое место по аналогичному ряду содержания ТМ в почвах: $Cd > Pb > Co > Zn > Mn > Ni > Fe > Cr > Cu$. В отличие от приведённого ранее ряда по

Таблица 3 / Table 3

Результаты факторного анализа в эксперименте 2020 г.
The results of factor analysis in 2020

Показатель Parameter	2020		
	фактор 1 factor 1	фактор 2 factor 2	фактор 3 factor 3
Cu	0,10	-0,15	0,69
Mn	0,02	0,29	0,83
Fe	0,04	-0,06	0,91
Zn	-0,42	-0,13	0,86
Pb	0,74	0,29	0,50
Cd	0,93	0,25	0,01
Ni	0,09	-0,89	-0,16
Co	0,06	-0,81	0,33
Cr	0,02	-0,22	0,87
Cu почва / Cu soil	0,24/ 0,92	-0,65/-0,15	0,67/0,25
Mn почва / Mn soil	0,25/ 0,81	-0,72 /0,44	0,29/0,31
Fe почва / Fe soil	-0,40/ 0,84	0,27/0,34	0,66/0,33
Zn почва / Zn soil	0,26/ 0,90	-0,89 /-0,31	0,21/0,32
Pb почва / Pb soil	0,86 /0,88	0,30/0,29	-0,38/-0,35
Cd почва / Cd soil	0,97 /0,88	-0,14/0,23	0,05/0,32
Ni почва / Ni soil	-0,28/0,56	-0,88 / -0,76	0,10/0,09
Co почва / Co soil	-0,48/ 0,88	-0,84 /0,28	-0,10/0,21
Cr почва / Cr soil	0,05/0,69	-0,99 /-0,62	0,07/0,25
Хлорофилл a / Chlorophyll a	-0,46	0,55	0,56
Хлорофилл b / Chlorophyll b	-0,39	0,70	0,47
Каротиноиды / Carotenoids	-0,46	0,59	0,52
Основания Шиффа / Schiff bases	-0,75	0,59	0,05
Диеновые конъюгаты Conjugated dienes	-0,79	0,15	0,40
Фенолы / Phenols	-0,75	-0,18	-0,39
Флавоноиды / Flavonoids	-0,89	-0,32	0,12
Каталаза / Catalase	0,87	0,03	-0,06
Пероксидаза / Peroxidase	-0,23	0,16	0,26
Объясняемая дисперсия, % Dispersion explained, %	39	26	19

Примечание: жирным шрифтом выделены статистически значимые ($p \leq 0,05$) значения факторных нагрузок. Для содержания тяжёлых металлов в почвах приведены факторные нагрузки по содержанию подвижной формы (числитель) и кислоторастворимой формы (знаменатель).

Note: statistically significant ($p \leq 0.05$) factor loadings are in bold. Factor loadings for heavy metals in soils are separate for mobile form (numerator) and acid-soluble form (denominator).

содержанию ТМ в растениях, где Со занимает пятое место, в ряду по содержанию ТМ в почвах он находится на третьем месте. Влияние Со на растения менее выражено, так как он обладает низкой способностью к транслокации. В то же время, вклад Fe оказался менее значимым в связи с его низкой подвижностью в почве.

Заключение

Получены регрессионные уравнения, связывающие содержание пигментов фотосинтеза в листьях мать-и-мачехи с уровнем Cu, Fe, Mn и Zn как в самих растениях, так и в почвах. Содержание фенольных антиоксидантов находилось в обратной взаимосвязи с концентрацией Cu и Mn в растениях. Содержание подвижной формы Fe, Zn и Cu в почвах позволяет прогнозировать содержание этих металлов в растениях мать-и-мачехи. Составлен ряд биохимических показателей по значимости их изменения в условиях загрязнения ТМ: хлорофилл *a* > хлорофилл *b* > каротиноиды > фенолы = основания Шиффа > флавоноиды > каталаза > диеновые конъюгаты > пероксидаза. Содержание ТМ в растениях по значимости влияния на биохимические показатели изменялось в ряду: Cd > Pb > Fe > Ni > Co > Cr > Mn > Cu > Zn. Кадмий и свинец занимают первое место по аналогичному ряду содержания ТМ в почвах: Cd > Pb > Co > Zn > Mn > Ni > Fe > Cr > Cu.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ и Тюменской области № 20-45-720011.

Литература

1. Barsova N., Yakimenko O., Tolpeshta I., Motuzova G. Current state and dynamics of heavy metal soil pollution in Russian Federation – a review // *Environmental Pollution*. 2019. V. 249. P. 200–207.
2. Rai P.K., Lee S.S., Zhang M., Tsang Y.F., Kim K. Heavy metals in food crops: health risks, fate, mechanisms and management // *Environment International*. 2019. V. 125. P. 365–385.
3. Kalaivanan D., Ganeshamurthy A.N. Mechanisms of heavy metal toxicity in plants // *Abiotic stress physiology of horticultural crops* / Eds. N.K. Srinivasa Rao, K.S. Shivashankara, R.H. Laxman. India: Springer, 2016. P. 85–102.
4. Yruea I. Transition metals in plant photosynthesis // *Metallomics*. 2013. V. 5. P. 1090–1109.
5. Скугорева С.Г., Ашихмина Т.Я., Фокина А.И., Лялина Е.И. Химические основы токсического действия тяжёлых металлов (обзор) // *Теоретическая и прикладная экология*. 2016. № 1. С. 4–13.
6. Чупахина Г.Н., Масленников П.В., Мальцева Е.Ю., Фролов Е.М., Бессережнова М.И. Антиоксидантный статус растений в условиях загрязнения кадмием городской среды // *Вестник Балтийского федерального университета им. И. Канта*. 2011. № 7. С. 16–23.
7. Фазлиева Э.Р., Киселева И.С. Биохимические реакции растений *Tussilago farfara* L. из природных местообитаний с разным уровнем техногенного загрязнения на избыток меди в среде // *Известия Тульского государственного университета. Естественные науки*. 2011. № 3. С. 246–256.
8. Lei Y., Korpelainen H., Li C. Physiological and biochemical response to high Mn concentrations in two contrasting *Populus cathayna* populations // *Chemosphere*. 2007. V. 68. P. 686–694.
9. Берсенева А.Г. Содержание тяжёлых металлов в почвах на территориях промышленных предприятий города Тюмени // *Вестник КрасГАУ*. 2015. № 6. С. 41–44.
10. Шигабаева Г.Н. Тяжёлые металлы в почвах некоторых районов г. Тюмени // *Вестник ТюмГУ. Экология и природопользование*. 2015. № 2. С. 92–102.
11. Seleznev A., Rudakov M. Some geochemical characteristics of puddle sediments from cities located in various geological, geographic, climatic and industrial zones // *Carpathian Journal of Earth and Environmental Sciences*. 2019. V. 14. P. 95–104.
12. Konstantinova E., Minkina T., Sushkova S., Konstantinov A., Rajput V.D., Sherstnev A. Urban soil geochemistry of an intensively developing Siberian city: a case study of Tyumen, Russia // *Journal of Environmental Management*. 2019. V. 239. P. 366–378.
13. Shikov A.N., Pozharitskaya O.N., Makarov V.G., Wagner H., Verpoorte R., Heinrich M. Medicinal plants of the Russian pharmacopeia; their history and applications // *Journal of Ethnopharmacology*. 2014. V. 154. P. 481–536.
14. Jaric S., Kostic O., Mataruga Z., Pavlovic D., Pavlovic M., Mitrovic M., Pavlovic P. Traditional wound-healing plants used in the Balkan Region (Southeast Europe) // *Journal of Ethnopharmacology*. 2018. V. 211. P. 311–328.
15. Petukhov A., Kremleva T., Petukhova G., Khritokhin N. Biochemical responses of medicinal plant *Tussilago farfara* L. to elevated heavy metal concentrations in soils of urban areas // *Toxics*. 2021. V. 9. No. 7. P. 171–182.
16. Petukhov A.S., Kremleva T.A., Petukhova G.A., Khritokhin N.A. Translocation of heavy metals in herbs under urban anthropogenic pollution conditions // *Environmental Processes*. 2020. V. 7. P. 1173–1196.
17. Петухов А.С., Кремлева Т.А., Петухова Г.А., Хритохин Н.А. Влияние антропогенного загрязнения среды г. Тюмени на показатели жизнедеятельности травянистых растений // *Известия Саратовского университета. Новая серия. Серия: Химия. Биология. Экология*. 2021. Т. 21. № 1. С. 87–98.
18. Шульгин И.А., Ничипорович А.А. Расчёт содержания пигментов с помощью номограмм // *Хлорофилл*. Минск: Наука и техника, 1974. С. 127–136.

19. Шведова А.А., Полянский Н.Б. Метод определения конечных продуктов перекисного окисления липидов в тканях – флуоресцирующих шиффовых оснований // Исследование синтетических и природных антиоксидантов *in vitro* и *in vivo*: Сборник научных статей / Под ред. Е.Б. Бурлаковой. М.: Наука, 1992. С. 72–73.

20. Ермаков А.И., Арасимович В.В., Ярош Н.П., Перуанский Ю.В., Луковникова Г.А., Иконникова М.И. Методы биохимического исследования растений. Л.: Агропромиздат, 1987. 456 с.

21. Королюк М.А., Иванова Л.И., Майорова Н.О., Токарев В.Е. Метод определения активности каталазы // Лабораторное дело. 1988. № 1. С. 16–22.

22. Nikolic M., Pavlovic J. Plant responses to iron deficiency and toxicity and iron use efficiency in plants // Plant Micronutrient Use Efficiency. 2018. V. 1. P. 55–69.

23. Shabbir Z., Sardar A., Shabbir A.A., Abbas G., Shamshad S., Khalid S., Natasha, Murtaza G., Dumat C., Shahid M. Copper uptake, essentiality, toxicity, detoxification and risk assessment in soil-plant environment // Chemosphere. 2020. V. 259. P. 127436–127565.

24. Huheey J.E. Inorganic chemistry: principles of structure and reactivity. New York: Harper and Row Publisher, 1994. 347 p.

25. Arif N., Yadav V., Singh S., Kushwaha B.K., Singh S., Trupathi D.K., Vishwakarma K., Sharma S., Dubey N.K., Chauhan D.K. Assessment of antioxidant potential of plants in response to heavy metals // Plant Response to Xenobiotics / Eds. A. Singh, S. Prasad, R. Singh. Springer, Singapore, 2016. P. 97–125.

26. Jouili H., Bouazizi H., Ferjani E.E. Plant peroxidases: biomarkers of metallic stress // Acta Physiologica Plant. 2011. V. 33. P. 2075–2082.

27. Li J., Jia Y., Dong R., Huang R., Liu P., Li X., Wang Z., Liu G., Chen Z. Advances in the mechanisms of plant tolerance to manganese toxicity // International Journal of Molecular Sciences. 2019. V. 20. P. 5096–5111.

References

1. Barsova N., Yakimenko O., Tolpeshta I., Motuzova G. Current state and dynamics of heavy metal soil pollution in Russian Federation – a review // Environmental Pollution. 2019. V. 249. P. 200–207. doi: 10.1016/j.envpol.2019.03.020

2. Rai P.K., Lee S.S., Zhang M., Tsang Y.F., Kim K. Heavy metals in food crops: health risks, fate, mechanisms and management // Environment International. 2019. No. 125. P. 365–385. doi: 10.1016/j.envint.2019.01.067

3. Kalaivanan D., Ganeshamurthy A.N. Mechanisms of heavy metal toxicity in plants // Abiotic stress physiology of horticultural crops. / Eds. N.K. Srinivasa Rao, K.S. Shivashankara, R.H. Laxman. India: Springer, 2016. P. 85–102. doi: 10.1007/978-81-322-2725-0

4. Yruela I. Transition metals in plant photosynthesis // Metallomics. 2013. V. 5. P. 1090–1109. doi: 10.1039/c3mt00086a

5. Skugoreva S.G., Ashihmina T.Ya., Fokina A.I., Lyalina E.I. Chemical grounds of toxic effect of heavy metals (review) // Theoretical and Applied Ecology. 2016. No. 1. P. 4–13 (in Russian). doi: 10.25750/1995-4301-2016-1-014-019

6. Chupahina G.N., Maslennikov P.V., Mal'ceva E.Ju., Frolov E.M. Plants antioxidant status in conditions of cadmium urban pollution // Vestnik Baltiyskogo federal'nogo universiteta im. I. Kanta. 2011. No. 7. P. 16–23 (in Russian).

7. Fazlieva Je.R., Kiseleva I.S. Biochemical reactions of *Tussilago farfara* L. from areas with different levels of copper anthropogenic pollution // Izvestiya Tul'skogo gosudarstvennogo universiteta. 2011. No. 3. P. 246–256 (in Russian).

8. Lei Y., Korpelainen H., Li C. Physiological and biochemical response to high Mn concentrations in two contrasting *Populus cathayna* populations // Chemosphere. 2007. V. 68. P. 686–694. doi: 10.1016/j.chemosphere.2007.01.066

9. Berseneva A.G. The content of the heavy metals in soils on the territory of the industrial enterprises in Tyumen // Vestnik KrasGAU. 2015. No. 6. P. 41–44 (in Russian).

10. Shigabaeva G.N. Heavy metals in soils of several districts of Tyumen // Vestnik TmGU. Ekologiya i prirodopolzovanie. 2015. No. 2. P. 92–102 (in Russian).

11. Seleznev A., Rudakov M. Some geochemical characteristics of puddle sediments from cities located in various geological, geographic, climatic and industrial zones // Carpathian Journal of Earth and Environmental Sciences. 2019. V. 14. P. 95–104. doi: 10.26471/cjees/2019/014/062

12. Konstantinova E., Minkina T., Sushkova S., Konstantinov A., Rajput V.D., Sherstnev A. Urban soil geochemistry of an intensively developing Siberian city: a case study of Tyumen, Russia // Journal of Environmental Management. 2019. V. 239. P. 366–378. doi: 10.1016/j.jenvman.2019.03.095

13. Shikov A.N., Pozharitskaya O.N., Makarov V.G., Wagner H., Verpoorte R., Heinrich M. Medicinal plants of the Russian pharmacopeia; their history and applications // Journal of Ethnopharmacology. 2014. V. 154. P. 481–536. doi: 10.1016/j.jep.2014.04.007

14. Jaric S., Kostic O., Mataruga Z., Pavlovic D., Pavlovic M., Mitrovic M., Pavlovic P. Traditional wound-healing plants used in the Balkan Region (Southeast Europe) // Journal of Ethnopharmacology. 2018. V. 211. P. 311–328. doi: 10.1016/j.jep.2017.09.018

15. Petukhov A., Kremleva T., Petukhova G., Khritokhin N. Biochemical responses of medicinal plant *Tussilago farfara* L. to elevated heavy metal concentrations in soils of urban areas // Toxics. 2021. V. 9. No. 7. P. 171–182. doi: 10.3390/toxics9070171

16. Petukhov A.S., Kremleva T.A., Petukhova G.A., Khritokhin N.A. Translocation of heavy metals in herbs under urban anthropogenic pollution conditions //

- Environmental Processes. 2020. V. 7. P. 1173–1196. doi: 10.1007/s40710-020-00470-3
17. Petukhov A.S., Kremleva T.A., Petukhova G.A., Hritohin N.A. Impact of anthropogenic pollution in Tyumen on herbs vital activity parameters // *Izvestiya Saratovskogo universiteta. Novaya seriya. Seriya: Himiya. Biologiya. Yekologiya*. 2021. V. 21. No. 1. P. 87–98 (in Russian).
18. Shulgin I.A., Nichiporovich A.A. Calculation of pigments content using nomograms // *Chlorophyll: Collection of scientific articles* / Ed. E.B. Burlakova. Minsk: Nauka i tekhnika, 1974. P. 127–136 (in Russian).
19. Shvedova A.A., Polyanskii N.B. Method of Schiff bases determination in tissues // *Study of synthetic and natural antioxidants in vitro and in vivo*. Moskva: Nauka, 1992. P. 72–73 (in Russian).
20. Ermakov A.I., Arasimovich V.V., Yarosh N.P., Peruanskiy Y.V., Lukovnikova G.A., Ikonnikova M.I. *Methods of plants biochemical research*. Leningrad: Agropromizdat, 1987. 456 p. (in Russian).
21. Koroljuk M.A., Ivanova L.I., Majorova N.O., Tokarev V.E. Method for catalase activity determination // *Laboratornoe Delo*. 1988. No. 1. P. 16–22 (in Russian).
22. Nikolic M., Pavlovic J. Plant responses to iron deficiency and toxicity and iron use efficiency in plants // *Plant Micronutrient Use Efficiency*. 2018. V. 1. P. 55–69. doi: 10.1016/B978-0-12-812104-7.00004-6
23. Shabbir Z., Sardar A., Shabbir A., Abbas G., Shamsad S., Khalid S., Natasha, Murtaza G., Dumat C., Shahid M. Copper uptake, essentiality, toxicity, detoxification and risk assessment in soil-plant environment // *Chemosphere*. 2020. V.259. P.127436–127565. doi:10.1016/j.chemosphere.2020.127436
24. Huheey J.E. *Inorganic Chemistry: Principles of Structure and Reactivity*. New York: Harper and Row Publisher, 1994. 347 p.
25. Arif N., Yadav V., Singh S., Kushwaha B.K., Singh S., Trupathi D.K., Vishwakarma K., Sharma S., Dubey N.K., Chauhan D.K. Assessment of antioxidant potential of plants in response to heavy metals // *Plant Response to Xenobiotics* / Eds. A. Singh, S. Prasad, R. Singh. Springer, Singapore, 2016. P. 97–125. doi: 10.1007/978-981-10-2860-1_5
26. Jouili H., Bouazizi H., Ferjani E.E. Plant peroxidases: biomarkers of metallic stress // *Acta Physiol Plant*. 2011. V. 33. P. 2075–2082. doi: 10.1007/s11738-011-0780-2
27. Li J., Jia Y., Dong R., Huang R., Liu P., Li X., Wang Z., Liu G., Chen Z. Advances in the mechanisms of plant tolerance to manganese toxicity // *International Journal of Molecular Sciences*. 2019. V. 20. P. 5096–5111. doi: 10.3390/ijms20205096

Применение удобрительных смесей на основе осадков сточных вод и цеолита в агроценозах масличных культур

© 2023. Д. В. Виноградов^{1,2}, д. б. н., зав. кафедрой,
М. П. Макарова¹, к. б. н., ст. преподаватель,
Т. В. Зубкова³, к. с.-х. н., зав. кафедрой,

¹Рязанский государственный агротехнологический университет имени П. А. Костычева,
390044, Россия, г. Рязань, ул. Костычева, д. 1,

²Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова,
119991, Россия, г. Москва, ул. Колмогорова, д. 1,

³Елецкий государственный университет им. И. А. Бунина,
399770, Россия, г. Елец, ул. Коммунаров, д. 28,

e-mail: vdvrzn@mail.ru, assistent_84@mail.ru, zubkovatanua@yandex.ru

В статье представлены результаты исследований, посвящённых изучению действия удобрительных смесей на основе осадка сточных вод (ОСВ) и цеолита в агроценозах масличных культур (ярового рапса сорта Ратник и подсолнечника сорта Посейдон 625). Применение удобрительных смесей на основе ОСВ и цеолита активизировало развитие листового аппарата и генеративных органов. В агроценозах ярового рапса количество стручков на одном растении увеличилось с 16,9 до 22,4 и количество семян с 196 до 326. В вариантах с удобрительными смесями урожай ярового рапса составлял 1,31–1,49 т/га с прибавкой к контролю 17,1–41,9%. При использовании удобрительных смесей в агроценозах подсолнечника с одной корзинки было получено 1194–1247 семян, что на 17,6–22,9% больше, чем в контроле. Урожайность маслосемян составила 2,37–2,68 т/га. Наибольшая продуктивность масличных культур отмечалась в варианте при внесении ОСВ и цеолита в соотношении 1 : 0,75. Важным агроэкологическим приёмом, снижающим негативное воздействие тяжёлых металлов, содержащихся в ОСВ, является применение цеолита – природного сорбента, обладающего высокой ёмкостью катионного обмена. Применение удобрительных смесей на основе ОСВ и цеолита привело к уменьшению накопления тяжёлых металлов в растительной продукции. Суммарный коэффициент загрязнения уменьшился на 0,11–0,41 ед. в вариантах с яровым рапсом, на 0,10–0,47 ед. – в вариантах с подсолнечником.

Ключевые слова: яровой рапс, подсолнечник, осадок сточных вод, цеолит.

The use of fertilizer mixtures based on sewage sludge and zeolite in oilseed agrocenoses

© 2023. D. V. Vinogradov^{1,2} ORCID: 0000-0003-2017-1491¹

M. P. Makarova¹ ORCID: 0000-0001-9007-5273²

T. V. Zubkova³ ORCID: 0000-0003-3525-488X³

¹Ryazan State Agrotechnological University named after P. A. Kostychev,
1, Kostycheva St., Ryazan, Russia, 390044,

²Lomonosov Moscow State University,
1, Kolmogorova St., Moscow, Russia, 119991,

³Yelets State University named after I. A. Bunin,
28, Kommunarov St., Yelets, Russia, 399770,

e-mail: vdvrzn@mail.ru, assistent_84@mail.ru, zubkovatanua@yandex.ru

The article presents the results of research devoted to the study of the effect of fertilizer mixtures based on sewage sludge and zeolite in agrocenoses of oil crops (spring rapeseed variety Ratnik and sunflower variety Poseidon 625). The use of fertilizer mixtures based on sewage sludge and zeolite has intensified the development of the leaf apparatus and generative organs. In spring rape agrocenoses, the number of pods per plant increased from 16.9 to 22.4 and the number of seeds from 196 to 326. In variants with fertilizer mixtures, the productivity of agrocenoses of spring rapeseed was 1.31–1.49 t/ha (plus 17.1–41.9% of the control). When using fertilizer mixtures in sunflower agrocenoses, 1194–1247 seeds were obtained from one basket, which is 17.6–22.9% more than in the control. The yield of oilseeds was 2.37–2.68 t/ha. The highest productivity of oilseeds was noted in the variant with the introduction of sewage sludge and zeolite in a ratio of 1 : 0.75. An important agroecological technique that reduces the negative impact of heavy metals

contained in sewage sludge is the use of zeolite, a natural sorbent with a high cation exchange capacity. The use of fertilizer mixtures based on sewage sludge and zeolite led to a decrease in the accumulation of heavy metals in plant products. The total pollution factor decreased by 0.11–0.41 units in variants with spring rape, by 0.10–0.47 units in variants with sunflower. As a result of the studies, conclusions were drawn about the possibility of using fertilizer mixtures consisting of sewage sludge and zeolite in agrocenoses of oilseeds (spring rapeseed and sunflower), provided that the obtained seeds are used for technical purposes.

Keywords: spring rapeseed, sunflower, sewage sludge, zeolite.

Вопросы утилизации осадков бытовых и промышленных сточных вод в настоящее время актуальны для всех регионов России. Хранение осадков сточных вод (ОСВ) на иловых площадках приводит к формированию крупных очагов загрязнения на территориях, прилегающих к очистным сооружениям, что является серьёзной экологической проблемой [1–3]. Отечественные и зарубежные авторы отмечают, что при условии незначительного содержания в ОСВ соединений тяжёлых металлов (ТМ) перспективным способом их утилизации является использование в качестве органоминеральных удобрений [4–8]. В настоящее время в России в качестве удобрений используют только 4–6% образующихся осадков. Для оптимизации параметров применения ОСВ в сельскохозяйственном производстве необходимо проведение многосторонней оценки эффективности и экологической безопасности действия осадка на компоненты агроценозов.

Одним из агроэкологических приёмов, позволяющих применять ОСВ в качестве удобрений, является их совместное использование с природным мелиорантом – цеолитом, обладающим высокой пористостью и ёмкостью катионного обмена [4, 9].

С целью снижения содержания различных поллютантов, поступающих в почву в результате антропогенного загрязнения, всё чаще используют методы фиторемедиации – выращивают специальные растения, поглощающие и аккумулирующие ионы ТМ. Так как уровень накопления ТМ в репродуктивных органах растений ниже, чем в вегетативных, использование в фиторемедиации сельскохозяйственных культур способствует отчуждению загрязняющих элементов с урожаем и снижению содержания их малоподвижных форм в почве [10–14].

В связи с возможностью производства растительных масел на технические цели выращивание масличных культур в качестве фитомелиоранта имеет важное практическое значение.

Цель исследований заключалась в оценке влияния удобрительных смесей на основе осадка сточных вод и цеолита на фотосинтези-

ческие параметры, продуктивность и элементы структуры урожая масличных культур, а также уровень химического загрязнения почв и получаемой продукции.

Объекты и методы исследований

Исследования проводили в 2008–2018 гг. на агротехнологической опытной станции ФГБОУ ВО РГАТУ, расположенной в Рязанском районе Рязанской области, в агроценозах ярового рапса (*Brassica napus*) сорта Ратник и подсолнечника (*Helianthus annuus*) сорта Посейдон 625 [15]. Площадь опытной делянки – 50 м², учётная площадь – 42 м², повторность – четырёхкратная.

Агрохимические свойства почв опытного участка: содержание гумуса (по Тюрину) – 3,6–3,8%, подвижного фосфора (по Кирсанову) – 169–174 мг/кг почвы, калия – 132–138 мг/кг почвы, обменная кислотность (вытяжка KCl) – 5,7–5,8.

В качестве основы для удобрительных смесей использовали ОСВ с очистных сооружений г. Рязани, соответствующие по агрохимическим, токсикологическим, санитарным параметрам ГОСТ Р 17.4.3.07-2001, и цеолит Хотынецкого месторождения Орловской области, характеризующийся щелочной реакцией среды (рН 8,3), высоким содержанием фосфора (1,93%) и калия (4,32%) (табл. 1) [16].

Варианты опыта: 1 – контроль (без удобрений); 2 – ОСВ (в дозе 9 т/га); 3 – удобрение-1 (1 ОСВ : 0,25 цеолит); 4 – удобрение-2 (1 ОСВ : 0,5 цеолит); 5 – удобрение-3 (1 ОСВ : 0,75 цеолит); 6 – удобрение-4 (1 ОСВ : 1 цеолит).

Агротехнические работы осуществляли в соответствии с зональными рекомендациями для Нечернозёмной зоны России. В опыте были проведены исследования морфологических и агробиологических особенностей роста и развития растений ярового рапса и подсолнечника по [17]. Площадь листовой поверхности определяли методом отпечатков в фазу цветения [18, 19]. Математическую обработку данных осуществляли по [20].

Таблица 1 / Table 1

Агрохимическая характеристика осадков сточных вод
Agrochemical characterization of sewage sludge

Показатель Indicator	Содержание в осадках сточных вод Content in sewage sludge	ГОСТ Р 17.4.3.07-2001 GOST R 17.4.3.07-2001
Влажность, % / Humidity, %	68,0±0,5	≤ 82,0
pH _{сол.} / pH _{sol.}	8,2±0,1	5,50–8,50
C _{орг.} , % на сухое вещество C _{org.} , % dry matter	74,0±0,8	≥ 20,0
Азот общий, % на сухое вещество Nitrogen total, % dry matter	1,74±0,10	≥ 0,6
Фосфор общий, % на сухое вещество Phosphorus total, % dry matter	1,60±0,10	≥ 1,5
Калий общий, % на сухое вещество Potassium total, % dry matter	0,33±0,05	n/n n/n

Примечание: n/n – показатель не нормирован ГОСТ Р 17.4.3.07-2001.
Note: n/n – indicator is not standardized by GOST R 17.4.3.07-2001.

Результаты и обсуждение

В результате проведённых исследований было установлено, что применение изучаемых удобрительных смесей, а также ОСВ в чистом виде в агроценозах масличных культур способствовало более интенсивному развитию листового аппарата (рис.).

Наблюдения за динамикой образования листовой поверхности растений масличных культур показали медленный темп этого процесса в начале вегетации (4–5%). В фазу цветения площадь листьев достигла максимальных значений. На последующих этапах развития за счёт подсыхания нижних листьев данный показатель постепенно уменьшался.

Так, в фазу цветения максимальная площадь ассимиляционной поверхности достигла в агроценозах ярового рапса – 10,4–22,1 тыс. м²/га, в агроценозах подсолнечника – 15,6–31,5 тыс. м²/га. В зависимости от применяемого удобрения прибавка к контролю составила 56,7–112,5 и 48,1–101,9% соответственно.

Обобщающим показателем фотосинтетической деятельности растений, определяющим эффективность применяемых удобрений, является фотосинтетический потенциал. У ярового рапса он изменялся в зависимости от применяемых удобрительных смесей от 0,92 до 2,19 млн м²·сут/га, у подсолнечника – от 0,96 до 1,47 млн м²·сут/га.

Поскольку продолжительность фотосинтеза у листьев и величина их ассимиляционной поверхности определяют формирование генеративных органов, а, следовательно, и урожай, в опыте было изучено влияние применяемых

удобрений на элементы структуры урожая и продуктивность растений (табл. 2).

Так, в агроценозах ярового рапса в варианте с чистым осадком было сформировано 17,8 продуктивных стручков на одном растении, в вариантах с удобрительными смесями – по 18,5–22,4 стручков, что составило увеличение на 9,9–38,3% к контролю. В опытных вариантах было получено от 260 семян с одного растения при внесении ОСВ в чистом виде до 326 семян при внесении осадка и цеолита в соотношении 1 : 0,75. Масса 1000 семян составила 3,35–3,58 г.

В агроценозах ярового рапса в контрольном варианте была получена средняя урожайность 1,05 т/га. Применение удобрительных смесей на основе ОСВ и цеолита способствовало повышению продуктивности растений ярового рапса на 17,1–41,9%.

В вариантах с использованием удобрительных смесей под подсолнечник среднее количество семян с одной корзинки составило 1194–1247 штук, превысив контроль на 17,6–22,9%. Масса 1000 семян в опытных вариантах составила 49,9–52,0 г. Наибольший урожай маслосемян 2,68 т/га был получен при внесении осадка и цеолита в соотношении 1 : 0,75.

Применение ОСВ в чистом виде привело к незначительному увеличению содержания ТМ в почве опытного участка (табл. 3).

Коэффициенты концентрации поллютантов, представляющие собой отношение содержания химического элемента в опытном варианте к его содержанию в контроле, соответствовали минимальному уровню загрязнения (больше 1,0, но меньше 2,0). Суммарный коэффициент загрязнения в вариантах с чи-

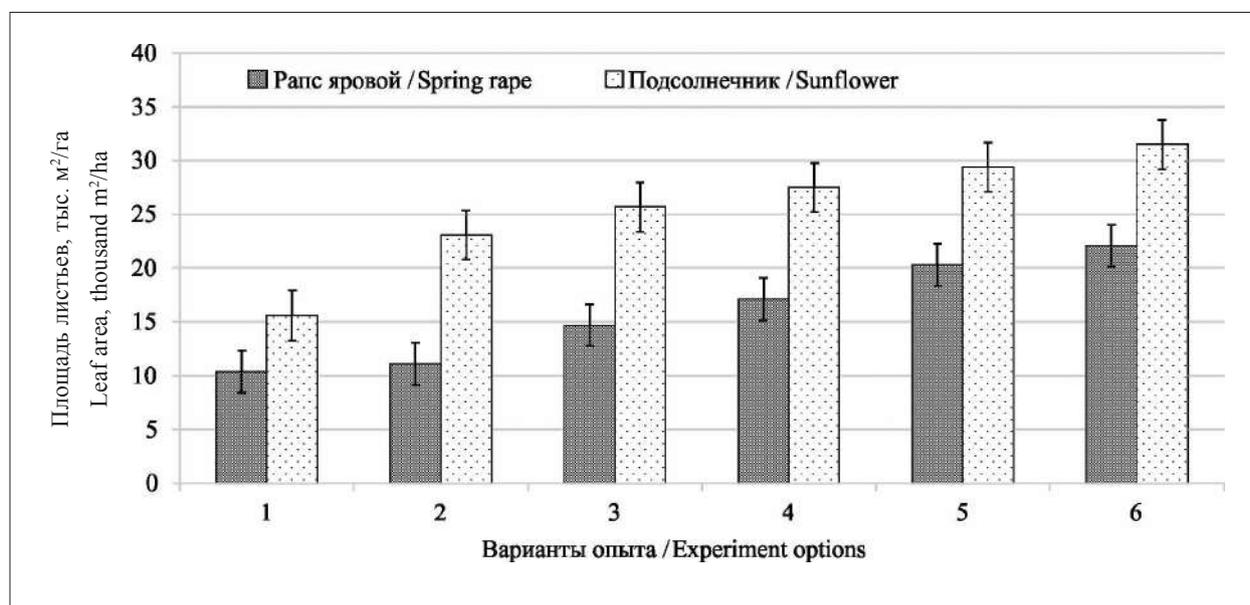


Рис. Влияние удобрительных смесей на основе ОСВ и цеолита на площадь ассимиляционной поверхности растений масличных культур. Условные обозначения: 1 – контроль (без удобрений), 2 – ОСВ (в дозе 9 т/га), 3 – удобрение-1 (1 ОСВ : 0,25 цеолит), 4 – удобрение-2 (1 ОСВ : 0,5 цеолит), 5 – удобрение-3 (1 ОСВ : 0,75 цеолит), 6 – удобрение-4 (1 ОСВ : 1 цеолит)

Fig. Influence of fertilizer mixtures based on sewage sludge and zeolite on the area of the assimilation surface of oilseed plants. Legend: 1 – control (no fertilizer), 2 – sewage sludge (at a dose of 9 t/ha), 3 – fertilizer-1 (1 sewage sludge : 0.25 zeolite), 4 – fertilizer-2 (1 sewage sludge : 0.5 zeolite), 5 – fertilizer-3 (1 sewage sludge : 0.75 zeolite), 6 – fertilizer-4 (1 sewage sludge : 1 zeolite)

Таблица 2 / Table 2

Влияние удобрительных смесей на основе ОСВ и цеолита на элементы структуры урожая и продуктивность масличных культур / Influence of fertilizer mixtures based on sewage sludge and zeolite on the elements of the crop structure and the productivity of oilseeds

Вариант Option	Количество семян, шт./растение Number of seeds on 1 plant, pieces	Масса 1000 семян, г The mass of 1000 seeds, g	Средняя урожайность, т/га Average productivity, t/ha
Рапс яровой / Spring rape			
Контроль / Control	200±40	3,35±0,29	1,05±0,12
ОСВ / Sewage sludge	260±31	3,43±0,25	1,23±0,07
Удобрение-1 / Fertilizer-1	277±36	3,46±0,23	1,31±0,11
Удобрение-2 / Fertilizer-2	290±40	3,51±0,26	1,39±0,15
Удобрение-3 / Fertilizer-3	330±40	3,58±0,24	1,49±0,10
Удобрение-4 / Fertilizer-4	285±36	3,58±0,23	1,41±0,08
Подсолнечник / Sunflower			
Контроль / Control	1015±13	45,2±0,23	2,16±0,06
ОСВ / Sewage sludge	1194±13	49,9±0,21	2,31±0,10
Удобрение-1 / Fertilizer-1	1209±11	51,4±0,18	2,37±0,08
Удобрение-2 / Fertilizer-2	1224±13	51,6±0,12	2,48±0,06
Удобрение-3 / Fertilizer-3	1247±8	52,0±0,20	2,68±0,07
Удобрение-4 / Fertilizer-4	1238±8	51,8±0,21	2,50±0,05

Таблица 3 / Table 3

Влияние удобрительных смесей на основе ОСВ и цеолита на уровень загрязнения почвы опытного участка / Influence of fertilizer mixtures based on sewage sludge and zeolite on the level of soil contamination in the experimental area

Вариант Option	Zn	Cu	Pb	Cd	Cr	Ni	Коэффициент Z_c Coefficient Z_c
Яровой рапс / Spring rapeseed							
Контроль Control	<u>25.9</u> 1,00	<u>16.4</u> 1,00	<u>10.1</u> 1,00	<u>0.25</u> 1,00	<u>16.3</u> 1,00	<u>7.1</u> 1,00	1,00
ОСВ Sewage sludge	<u>34.3</u> 1,32	<u>22.5</u> 1,37	<u>11.3</u> 1,12	<u>0.32</u> 1,28	<u>25.4</u> 1,56	<u>9.4</u> 1,32	2,97
Удобрение-1 Fertilizer-1	<u>33.0</u> 1,27	<u>21.9</u> 1,34	<u>11.1</u> 1,10	<u>0.31</u> 1,24	<u>24.9</u> 1,53	<u>9.2</u> 1,30	2,78
Удобрение-2 Fertilizer-2	<u>31.7</u> 1,22	<u>20.7</u> 1,26	<u>11.0</u> 1,09	<u>0.30</u> 1,20	<u>24.0</u> 1,47	<u>8.8</u> 1,24	2,48
Удобрение-3 Fertilizer-3	<u>30.9</u> 1,19	<u>19.5</u> 1,19	<u>10.8</u> 1,07	<u>0.28</u> 1,12	<u>22.7</u> 1,39	<u>8.5</u> 1,20	2,16
Удобрение-4 Fertilizer-4	<u>29.5</u> 1,14	<u>19.0</u> 1,16	<u>11.0</u> 1,09	<u>0.29</u> 1,16	<u>22.5</u> 1,38	<u>8.4</u> 1,18	2,11
Подсолнечник / Sunflower							
Контроль Control	<u>25.4</u> 1,00	<u>16.6</u> 1,00	<u>10.1</u> 1,00	<u>0.25</u> 1,00	<u>16.3</u> 1,00	<u>7.2</u> 1,00	1,00
ОСВ Sewage sludge	<u>35.0</u> 1,38	<u>20.5</u> 1,23	<u>10.9</u> 1,08	<u>0.30</u> 1,20	<u>25.7</u> 1,58	<u>9.6</u> 1,33	2,80
Удобрение-1 Fertilizer-1	<u>34.1</u> 1,34	<u>19.9</u> 1,20	<u>10.6</u> 1,05	<u>0.28</u> 1,12	<u>24.7</u> 1,52	<u>9.5</u> 1,32	2,55
Удобрение-2 Fertilizer-2	<u>33.7</u> 1,33	<u>18.7</u> 1,13	<u>10.5</u> 1,04	<u>0.28</u> 1,12	<u>24.7</u> 1,52	<u>8.8</u> 1,22	2,36
Удобрение-3 Fertilizer-3	<u>32.9</u> 1,30	<u>17.5</u> 1,05	<u>10.4</u> 1,03	<u>0.26</u> 1,04	<u>22.7</u> 1,39	<u>8.5</u> 1,18	1,99
Удобрение-4 Fertilizer-4	<u>30.5</u> 1,20	<u>16.9</u> 1,02	<u>10.3</u> 1,02	<u>0.26</u> 1,04	<u>22.5</u> 1,38	<u>8.4</u> 1,17	1,83

Примечание: в числителе – валовое содержание, мг/кг; в знаменателе – коэффициент концентрации (K_c).
Note: the numerator is gross content, mg/kg; the denominator is concentration factor (K_c).

стым осадком составил 2,97 ед. в агроценозах ярового рапса и 2,80 ед. в агроценозах подсолнечника. При внесении удобрительных смесей значение данного показателя снизилось до 2,11–2,78 ед. и 1,83–2,55 ед. соответственно в сельскохозяйственной культуре. Следует отметить, что содержание в почве соединений ТМ находилось в прямой зависимости от дозы мелиоранта в удобрительной смеси.

Проведённый химический анализ маслосемян ярового рапса показал, что добавление к осадку цеолита способствовало снижению содержания цинка и никеля на 8,8%, меди – на 11,5%, хрома – до уровня контроля. Коэффициенты концентрации ТМ составили в вариантах с удобрительными смесями 1,00–1,30, в варианте с ОСВ – 1,05–1,35 (табл. 4).

Наибольшие значения коэффициента концентрации в маслосеменах ярового рапса отмечали по меди, свинцу, цинку и никелю.

В среднем по данному показателю при применении ОСВ в чистом виде был выделен следующий убывающий ряд: $Cu > Zn, Ni > Pb > Cd > Cr$, при применении удобрительных смесей на основе ОСВ и цеолита: $Cu > Pb > Zn, Ni, Cd > Cr$. Коэффициент Z_c уменьшился с 1,89 ед. в варианте с чистым осадком до 1,48 ед. в варианте с максимальной дозой цеолита в удобрительной смеси.

Уровень загрязнения семян подсолнечника был несколько выше, чем семян ярового рапса – коэффициент Z_c составил 1,99 в варианте с ОСВ, 1,52–1,89 – в вариантах с удобрительными смесями.

Заклучение

В работе изучено влияние удобрительных смесей, состоящих из ОСВ и цеолита, на биометрические и фотосинтетические показатели

Таблица 4 / Table 4

Влияние удобрительных смесей на основе ОСВ и цеолита на уровень загрязнения семян масличных культур / Influence of fertilizer mixtures based on sewage sludge and zeolite on the level of contamination of oilseeds

Вариант Option	Коэффициент концентрации (K_c) Concentration factor (K_c)						Коэффициент Z_c Coefficient Z_c
	Zn	Cu	Pb	Cd	Cr	Ni	
Яровой рапс / Spring rapeseed							
Контроль Control	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
ОСВ Sewage sludge	1,15	1,35	1,12	1,07	1,05	1,15	1,89
Удобрение-1 Fertilizer-1	1,12	1,30	1,12	1,07	1,05	1,12	1,78
Удобрение-2 Fertilizer-2	1,08	1,25	1,12	1,07	1,02	1,10	1,64
Удобрение-3 Fertilizer-3	1,05	1,22	1,12	1,07	1,00	1,05	1,51
Удобрение-4 Fertilizer-4	1,05	1,19	1,12	1,07	1,00	1,05	1,48
Подсолнечник / Sunflower							
Контроль Control	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
ОСВ Sewage sludge	1,08	1,47	1,24	1,05	1,03	1,12	1,99
Удобрение-1 Fertilizer-1	1,07	1,45	1,22	1,02	1,02	1,11	1,89
Удобрение-2 Fertilizer-2	1,05	1,41	1,20	1,02	1,01	1,08	1,77
Удобрение-3 Fertilizer-3	1,03	1,35	1,17	1,02	1,00	1,06	1,63
Удобрение-4 Fertilizer-4	1,02	1,31	1,15	1,01	1,00	1,03	1,52

растений наиболее распространённых в Рязанской области масличных культур: ярового рапса и подсолнечника. Установлено, что применение удобрительных смесей привело к увеличению площади листового аппарата, что положительно отразилось на продуктивности агроценозов масличных культур. Урожайность маслосемян ярового рапса превысила контроль на 0,26–0,44 т/га, подсолнечника – на 0,21–0,52 т/га. Наибольшее положительное действие оказала удобрительная смесь ОСВ и цеолита в соотношении 1 : 0,75.

При использовании ОСВ в качестве компонента удобрительных смесей в агроценозах масличных культур важным агроэкологическим приёмом, снижающим токсический эффект ТМ, содержащихся в ОСВ, является применение природного сорбента – цеолита, обладающего высокой ёмкостью катионного обмена. Суммарный коэффициент загрязнения Z_c уменьшился на 0,11–0,41 ед.

в вариантах с яровым рапсом, на 0,10–0,47 ед. в вариантах с подсолнечником. При этом максимальная доза мелиоранта была наиболее эффективной.

Таким образом, внесение ОСВ совместно с цеолитом позволило использовать отходы, содержащие большое количество биогенных элементов, в сельскохозяйственном производстве. При утилизации ОСВ в качестве альтернативного приёма фиторемедиации возможно выращивание масличных культур (ярового рапса, подсолнечника) при условии использования маслосемян на технические цели.

Литература

1. Kohnová S., Rončák P., Hlavčová K., Szolgay J., Rutkowska A. Future impacts of land use and climate change on extreme runoff values in selected catchments of Slovakia // *Meteorology Hydrology and Water Management*. 2019. V. 7. No. 1. P. 47–55.

2. Kuchar L., Tiukało A. Impact of environmental issues on research society and topic distribution in academic interest of Wrocław (Poland) – on the 5th anniversary of the environmental seminar on meteorology, hydrology and water management // *Meteorology Hydrology and Water Management*. 2018. V. 6. No. 2. P. 79–83.

3. Щур А.В., Виноградов Д.В., Валько В.П. Влияние различных уровней агроэкологических нагрузок на биохимические характеристики почвы // *Юг России: экология, развитие*. 2016. Т. 11. № 4. С. 139–148.

4. Виноградов Д.В., Василева В.М., Макарова М.П., Кочуров Б.И., Лупова Е.И. Агроэкологическое действие осадка сточных вод и его смесей с цеолитом на агроценозы масличных культур // *Теоретическая и прикладная экология*. 2019. № 3. С. 127–133.

5. Хабарова Т.В., Виноградов Д.В., Кочуров Б.И., Левин В.И., Бышов Н.В. Агроэкологическая эффективность использования осадка сточных вод и вермикомпостов в агроценозе овса посевного // *Юг России: экология, развитие*. 2018. Т. 13. № 2. С. 132–143.

6. Yang M., Shi L., Xu F.S., Lu J.W., Wang Y.H. Effects of B, Mo, Zn, and their interactions on seed yield of rapeseed // *Pedosphere*. 2009. V. 19. No. 1. P. 53–59.

7. Arab R., Yadavi A., Balouchi H., Khademhamzeh H. The effect of irrigation interval and iron and zinc foliar application on some morpho-physiological characteristics and yield of sunflower // *Electronic Journal of Crop Production*. 2018. V. 11. No. 2. P. 77–90.

8. Nouraein M., Bakhtiarzadeh R., Janmohammadi M., Mohammadzadeh M., Sabaghnia N. The effects of micronutrient and organic fertilizers on yield and growth characteristics of sunflower (*Helianthus annuus* L.) // *Helia*. 2019. V. 42. No. 71. P. 249–264.

9. Chipera S.J., John A.A. Geochemical stability of natural zeolites // *Reviews in Mineralogy and Geochemistry*. 2001. V. 45. No. 1. P. 117–161.

10. Vasileva V., Lupova E. The yield of spring bird rape (*Brassica campestris* L.) varieties according to the level of mineral nutrition // *Bulgarian Journal of Agricultural Science*. 2021. V. 27. No. 4. P. 744–750.

11. Woźniak E., Waszkowska E., Zimny T., Sowa S., Twardowski T. The rapeseed potential in Poland and Germany in the context of production, legislation, and intellectual property rights // *Front. Plant Sci*. 2019. V. 10. Article No. 1423.

12. Zubkova T., Motyleva S., Dubrovina O., Brindza J. The study of rapeseeds ash composition in the conditions of the agroecological experiment // *Potravinarstvo Slovak Journal of Food Sciences*. 2021. No. 15. P. 156–161.

13. Vasileva V. Aboveground to root biomass ratios in pea and vetch after treatment with organic fertilizer // *Global Journal of Environmental Science and Management (GJESM)*. 2015. V. 1. No. 2. P. 145–148.

14. Vinogradov D.V., Makarova M.P., Kryuchkov M.M. The use of mineral fertilizers in sunflower crops in the conditions of Ryazan Region // *IOP Conf. Series: Earth and*

Environmental Science. Series “International Conference on World Technological Trends in Agrobusiness”. 2021. V. 624. Article No. 012077.

15. Методика проведения полевых агротехнических опытов с масличными культурам / Под ред. В.М. Лукомца. Краснодар: ФНЦ ВНИИМК, 2010. 327 с.

16. ГОСТ Р 17.4.3.07-2001. Охрана Природы. Почвы. Требования к свойствам осадков сточных вод при использовании их в качестве удобрений. М.: Стандартинформ, 2008. 5 с.

17. Методика Государственного сортоиспытания сельскохозяйственных культур / Под ред. М.А. Федина. М.: В.и., 1983. 184 с.

18. Lesny J., Kuchar L., Panfil M., Vinogradov D., Draganska E. Characteristic decrease in the value of rapeseed evapotranspiration after its ripening // *Agronomy*. 2021. V. 11. Article No. 2523.

19. Bakulina G., Fedoskin V., Pikushina M., Kukhar V., Kot E. Factor analysis models in enterprise costs management // *International Journal of Circuits, Systems and Signal Processing*. 2020. V. 14. P. 232–240.

20. Доспехов Б.А. Методика полевого опыта (с основами статистической обработки результатов исследований). М.: Агропромиздат, 1985. 351 с.

References

1. Kohnová S., Rončák P., Hlavčová K., Szolgay J., Rutkowska A. Future impacts of land use and climate change on extreme runoff values in selected catchments of Slovakia // *Meteorology Hydrology and Water Management*. 2019. V. 7. No. 1. P. 47–55. doi: 10.26491/mhwm/97254

2. Kuchar L., Tiukało A. Impact of environmental issues on research society and topic distribution in academic interest of Wrocław (Poland) – on the 5th anniversary of the environmental seminar on meteorology, hydrology and water management // *Meteorology Hydrology and Water Management*. 2018. V. 6. No. 2. P. 79–83. doi: 10.26491/mhwm/92467

3. Shchur A.V., Vinogradov D.V., Valckho V.P. Effect of different levels agroecological loads on biochemical characteristics of soil // *South of Russia: Ecology, Development*. 2016. V. 11. No. 4. P. 139–148 (in Russian). doi: 10.18470/1992-1098-2016-4-139-148

4. Vinogradov D.V., Vasileva V.M., Makarova M.P., Kochurov B.I., Lupova E.I. Agroecological effect of sewage sludge and its mixtures with zeolite on agrocenoses of oilseeds // *Theoretical and Applied Ecology*. 2019. No. 3. P. 122–128 (in Russian). doi: 10.25750/1995-4301-2019-3-127-133

5. Khabarova T.V., Vinogradov D.V., Kochurov B.I., Levin V.I., Byshov N.V. Agroecological efficiency of sewage sludge and vermicompost in agrocenoses of cultivated oat // *South of Russia: Ecology, Development*. 2018. V. 13. No. 2. P. 132–143 (in Russian). doi: 10.18470/1992-1098-2018-2-132-143

6. Yang M., Shi L., Xu F.S., Lu J.W., Wang Y.H. Effects of B, Mo, Zn, and their interactions on seed yield of rapeseed // *Pedosphere*. 2009. V. 19. No. 1. P. 53–59. doi: 10.1016/S1002-0160(08)60083-1
7. Arab R., Yadavi A., Balouchi H., Khademhamzeh H. The effect of irrigation interval and iron and zinc foliar application on some morpho-physiological characteristics and yield of sunflower // *Electronic Journal of Crop Production*. 2018. V. 11. No. 2. P. 77–90. doi: 10.22069/EJCP.2018.12696.2018
8. Nouraiein M., Bakhtiarzadeh R., Janmohammadi M., Mohammadzadeh M., Sabaghnia N. The effects of micronutrient and organic fertilizers on yield and growth characteristics of sunflower (*Helianthus annuus* L.) // *Helia*. 2019. V. 42. No. 71. P. 249–264. doi: 10.1515/helia-2019-0015
9. Chipera S.J., John A.A. Geochemical stability of natural zeolites // *Reviews in Mineralogy and Geochemistry*. 2001. V. 45. No. 1. P. 117–161. doi: 10.2138/rmg.2001.45.3
10. Vasileva V., Lupova E. The yield of spring bird rape (*Brassica campestris* L.) varieties according to the level of mineral nutrition // *Bulgarian Journal of Agricultural Science*. 2021. V. 27. No. 4. P. 744–750.
11. Woźniak E., Waszkowska E., Zimny T., Sowa S., Twardowski T. The rapeseed potential in Poland and Germany in the context of production, legislation, and intellectual property rights // *Front. Plant Sci*. 2019. V. 10. Article No. 1423. doi: 10.3389/fpls.2019.01423
12. Zubkova T., Motyleva S., Dubrovina O., Brindza J. The study of rapeseeds ash composition in the conditions of the agroecological experiment // *Potravinarstvo Slovak Journal of Food Sciences*. 2021. No. 15. P. 156–161. doi: 10.5219/1356
13. Vasileva V. Aboveground to root biomass ratios in pea and vetch after treatment with organic fertilizer // *Global Journal of Environmental Science and Management (GJESM)*. 2015. V. 1. No. 2. P. 145–148. doi: 10.7508/GJESM.2015.02.006
14. Vinogradov D.V., Makarova M.P., Kryuchkov M.M. The use of mineral fertilizers in sunflower crops in the conditions of Ryazan region // *IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science*. Series “International Conference on World Technological Trends in Agrobusiness”. 2021. V. 624. Article No. 012077. doi: 10.1088/1755-1315/624/1/012077
15. Methods of conducting field agrotechnical experiments with oilseeds / Ed. V.M. Lukomets. Krasnodar: FNTs VNIIMK, 2010. 327 p. (in Russian).
16. GOST R 17.4.3.07-2001. Nature protection. Soils. Requirements for the use of sewage sludge when using them in the quality of wastewater. Moskva: Standardinform, 2008. 5 p. (in Russian).
17. Methodology of the State Assortment of Agricultural Cultures / Ed. M.A. Fedin. Moskva: B.i., 1983. 184 p. (in Russian).
18. Lesny J., Kuchar L., Panfil M., Vinogradov D., Draganska E. Characteristic decrease in the value of rapeseed evapotranspiration after its ripening // *Agronomy*. 2021. V. 11. Article No. 2523. doi: 10.3390/agronomy11122523
19. Bakulina G., Fedoskin V., Pikushina M., Kukhar V., Kot E. Factor analysis models in enterprise costs management // *International Journal of Circuits, Systems and Signal Processing*. 2020. V. 14. P. 232–240.
20. Dospekhov B.A. Mid-range survey methodology (based on the statistical processing of the survey results). Moskva: Agropromizdat, 1985. 351 p. (in Russian).

Компост из куриного помёта как источник устойчивости почвенных актиномицетов к антибиотикам

© 2023. И. Г. Широких^{1,2}, д. б. н., в. н. с., профессор,
Н. А. Боков², м. н. с., аспирант, Н. Е. Завьялова³, д. б. н., г. н. с.,
Т. Я. Ашихмина^{1,2}, д. т. н., зав. лабораторией, г. н. с.,

¹Институт биологии Коми научного центра Уральского отделения
Российской академии наук,

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

²Вятский государственный университет,

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

³Пермский Федеральный исследовательский центр

Уральского отделения Российской академии наук,

614990, Россия, г. Пермь, ул. Ленина, д. 13а,

e-mail: irgenal@mail.ru

Развитие птицеводства сопровождается существенным увеличением объёмов производимого куриного помёта и его концентрацией в местах хранения, что приводит к загрязнению окружающей среды. Традиционной формой утилизации помёта является его использование в качестве органического удобрения. Высокое содержание органики и элементов минерального питания в компостах, приготовленных на основе животноводческих отходов, улучшает структуру почвы и способствует почвенному плодородию. Однако, ввиду широкого применения в птицеводстве антибиотиков, удобрения на основе птичьего помёта могут повлиять на антибиотический резистом почвы и, в итоге, способствовать распространению устойчивости к антибиотикам среди клинически значимых микроорганизмов. В этой связи актуальной является оценка влияния свежего и ферментированного куриного помёта на антибиотический резистом почвы, используемой в сельскохозяйственном производстве. В данной работе представлены результаты сравнительного исследования спектров устойчивости к определённому набору антибиотиков и частоты встречаемости резистентных к антибиотикам штаммов среди типичных почвенных бактерий – актиномицетов. Культуры актиномицетов выделены из компоста на основе куриного помёта и дерново-подзолистой почвы: после удобрения компостом, в процессе его хранения (под буртом) и фоновой, не контактировавшей с птичьим помётом или компостом. Определены группы антибиотиков, устойчивость к которым статистически значимо увеличилась в результате использования компоста на основе куриного помёта – тетрациклины, рифампицины и хинолоны.

Ключевые слова: куриный помёт, компост, дерново-подзолистая почва, антибактериальные препараты, *Streptomyces*, антибиотический резистом.

Compost from chicken manure as a source of antibiotic resistance of soil actinomycetes

© 2023. I. G. Shirokikh^{1,2} ORCID: 0000-0002-3319-2729, N. A. Bokov² ORCID: 0000-0002-1000-1192,
N. E. Zavyalova³ ORCID: 0000-0003-4005-8998, T. Ya. Ashikhmina^{1,2} ORCID: 0000-0003-4919-0047

¹Institute of Biology of the Komi Science Centre of the Ural Branch
of the Russian Academy of Sciences,

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

²Vyatka State University,

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

³Perm Federal Research Centre Ural Branch of the Academy of Sciences,

13a, Lenina St., Perm, Russia, 614990,

e-mail: irgenal@mail.ru

The development of poultry farming is accompanied by a significant increase in the volume of chicken manure produced and its concentration in storage areas, which leads to environmental pollution. The traditional form of manure

disposal is its use as an organic fertilizer. The high content of organic matter and mineral nutrition elements in compost prepared on the basis of chicken manure improves the soil structure and promotes soil fertility. However, due to the widespread use of antibiotics in poultry farming, fertilizers based on bird droppings can affect the antibiotic resistance of the soil and, as a result, contribute to the spread of antibiotic resistance among clinically significant microorganisms. In this regard, it is relevant to assess the effect of fresh and fermented chicken manure on the antibiotic resistance of the soil used in agricultural production. This paper presents the results of a comparative study of the spectra of resistance to a certain set of antibiotics and the frequency of occurrence of antibiotic-resistant strains among typical soil bacteria – actinomycetes. Actinomycete cultures were isolated from compost based on chicken manure and sod-podzolic soil: after fertilization with compost, during its storage (under the burt) and background, not in contact with bird droppings or compost. Groups of antibiotics have been identified, the resistance to which has increased statistically significantly as a result of using compost based on chicken manure – tetracyclines, rifampicins and quinolones.

Keywords: chicken manure, compost, sod-podzolic soil, antibacterial drugs, *Streptomyces*, antibiotic resistance.

Птицеводство занимает в настоящее время лидирующие позиции в сельскохозяйственном сегменте экономики по всему миру. Укрупнение птицеводческих комплексов приводит к существенному увеличению объёмов производимого помёта и его концентрации в местах хранения, что способствует загрязнению окружающей среды (ОС) и нарушению экологического состояния территорий, примыкающих к птицеводческим предприятиям [1]. Мировая и отечественная практика показывают, что наиболее традиционной формой утилизации птичьего помёта является использование его в качестве органического удобрения. Содержащиеся в помёте вещества улучшают структуру почвы и способствуют увеличению её плодородия и урожайности сельскохозяйственных культур. Содержание основных элементов питания для растений в помёте значительно варьирует в зависимости от его вида (нативный и подстилочный), степени его разложения и вида птицы. Удобрительная ценность куриного помёта предварительно определяется следующими данными по содержанию элементов минерального питания: азот общий – 6,2%, фосфор (P_2O_5) – 3,5%, калий (K_2O) – 2,1% от массы свежего помёта (согласно РД-АПК 1.10.15.02-17). Однако сырой птичий помёт является не только быстродействующим эффективным органическим удобрением, но и опасным источником загрязнения и заражения ОС. К сожалению, по разным причинам, свыше 40 млн т навоза и птичьего помёта сбрасывается ежегодно в водоёмы, балки, ложбины, вызывая загрязнение почвы, грунтовых и поверхностных вод [2].

С побочными продуктами птицеводства и животноводства связан такой чрезвычайно важный аспект, как распространение в ОС генов резистентности к антибиотикам (antibiotic resistance genes – ARGs), благодаря сбросу в ОС отходов жизнедеятельности сельскохозяйственных животных, получавших антибио-

тики для лечения, профилактики заболеваний и в качестве стимуляторов роста [3, 4].

Результаты многих исследований указывают на существование связи между применением антибиотиков в животноводстве и распространением устойчивости к противомикробным препаратам у людей [5, 6]. Устойчивость к антибиотикам угрожает самим основам современной медицины, и в ближайшие десятилетия антибиотикорезистентность может стать более частой причиной смертей, чем онкология. Эта проблема особо обострилась в связи с пандемией коронавируса SARS-CoV-2 и ускорением образования антибиотикорезистентных госпитальных штаммов [7–9].

Важнейшую роль в формировании и распространении среди микробных популяций антибиотикорезистентности играют универсальные для бактерий процессы обмена генетической информацией – конъюгация, трансформация, трансдукция и рекомбинация. В результате передачи в составе мобильных элементов генома (транспозоны, интегроны, IS-элементы, плазмиды) ARG могут свободно циркулировать в природе [10, 11].

Почва, как естественная среда обитания микроорганизмов, представляет собой резервуар устойчивых форм и содержит соответствующую генетическую информацию об устойчивости к антибиотикам [11–13]. Однако распространение устойчивости к антибиотикам в почвах разного генезиса и, тем более, при различном сельскохозяйственном использовании, изучено довольно фрагментарно [14–16]. Высокие уровни устойчивости, как средство самозащиты от разрушения собственными антибиотиками, характерны для мицелиальных прокариот – актиномицетов, которые лидируют среди известных в настоящее время среди промышленных продуцентов антибиотиков. Значительный вклад актиномицетов в формирование почвенного антибиотического резистома был отмечен неоднократно [12, 17]. Врождённая антибиотикоустойчивость широ-

ко распространена среди представителей рода *Streptomyces* и обусловлена особенностями строения внешних клеточных покровов, препятствующих проникновению антибиотика в клетку, и наличием различных неспецифических эффлюкс-систем, обеспечивающих удаление из клетки токсичных для неё веществ [17, 18].

Цель работы – сравнение антибиотической резистентности почвенных стрептомицетов при использовании компоста на основе куриного помёта в качестве органического удобрения на дерново-подзолистой почве.

Материалы и методы исследования

Образцы для выделения чистых культур актиномицетов в работе были представлены следующими субстратами: интактная дерново-подзолистая почва; почва, отобранная под буртом компоста; компост на основе куриного помёта; почва после внесения компоста. Из каждого образца при микробиологическом посеве на казеин-глицериновый агар было выделено не менее 15 штаммов с типичными для рода *Streptomyces* культуральными и морфологическими признаками [19]. Выборочно штаммы идентифицировали с помощью метода молекулярной филогении. Первичный сравнительный анализ полученных нуклеотидных последовательностей фрагмента 16S рРНК (ООО «Синтол», г. Москва) с последовательностями из базы данных GenBank проводили с помощью программы NCBI BLAST (<http://www.ncbi.nlm.nih.gov/blast>). Парное выравнивание последовательностей осуществляли с помощью программы LALIGN (https://embnet.vital-it.ch/software/LALIGN_form.html).

Для определения чувствительности выделенных культур к антибиотикам использовали диски индикаторные ДИ-ПЛС-50-01 по ТУ 9398-001-39484474-2000 (НИЦФ, Россия, СПб) с антибиотиками в следующих концентрациях: 30 мкг канамицин (КАН); 20 мкг амоксициллин (АКК); 30 мкг налидиксовая кислота (НК); 1,25/23,75 мкг триметоприм/сульфаметоксазол (ТС); 30 мкг тетрациклин (ТЕТ); 30 мкг стрептомицин (СТР), 5 мкг рифампицин (РФМ); 300 ЕД полимиксин (ПМ); 15 мкг линкомицин (ЛНК), 15 мкг азитромицин (АРН), 30 мкг цефтриаксон (ЦРО). Тестировали не менее 15 природных изолятов из каждого образца. Фиксировали величину диаметров зон ингибирования роста изолятов каждым антибиотиком в соответствии с инструкцией к тест-системе.

На основе данных о величине зон ингибирования антибиотиками роста стрептомицетов была построена тепловая карта антибиотических резистомов в разных субстратах с использованием электронного сервиса <https://build.ngchm.net/NGCHM-web-builder/#> [20].

В выборках изолятов равного объёма, полученных из разных субстратов, определяли также долю/встречаемость (%) резистентных к каждому антибиотику штаммов. Обработку результатов осуществляли методами непараметрической статистики с помощью онлайн-калькулятора статистики Statistics Kingdom (<http://www.statskingdom.com>). Для попарного сравнения вариантов использовали *U*-критерий Манна-Уитни.

Результаты и обсуждение

В общей сложности из исследуемых субстратов было выделено в чистую культуру 64 бактерии с характерными для рода *Streptomyces* микроморфологическими признаками: нефрагментированный субстратный и воздушный мицелий, длинные цепочки спор на воздушном мицелии и отсутствие спор на субстратном мицелии [19]. Выборочный анализ фрагментов гена 16S рРНК у изолятов данного морфотипа подтвердил, что выделенные культуры являются представителями рода *Streptomyces*, семейства Streptomycetaceae, порядка Streptomycetales, класса Actinobacteria.

Далее диско-диффузионным методом определяли у изолятов чувствительность/резистентность к антибиотикам из различных классов и разных механизмов действия, регистрируя величины зон ингибирования роста каждой культуры отдельными антибактериальными препаратами, взятыми в клинически значимых концентрациях. Совокупность полученных данных визуализировали в виде тепловой карты, на которой принадлежность отдельных изолятов к исследуемым субстратам отображена следующим образом: компост на основе куриного помёта (П11), интактная почва (П13), удобренная компостом почва (П14), почва под буртом куриного помёта (П15) (рис. 1, см. цв. вкладку II).

Анализ иерархической кластеризации 64-х изолятов из разных субстратов выявил среди них наличие трёх обособленных групп. Первая группа объединила 17 штаммов, полученных как из интактной почвы (23,4%), так и из субстратов, в разной степени сопряжённых с куриным помётом. Наибольшую долю (35,4%) составили изоляты из почвы, ото-

И. Г. Широких, Н. А. Боков, Н. Е. Завьялова, Т. Я. Ашихмина
 «Компост из куриного помёта как источник устойчивости
 почвенных актиномицетов к антибиотикам». С. 101.

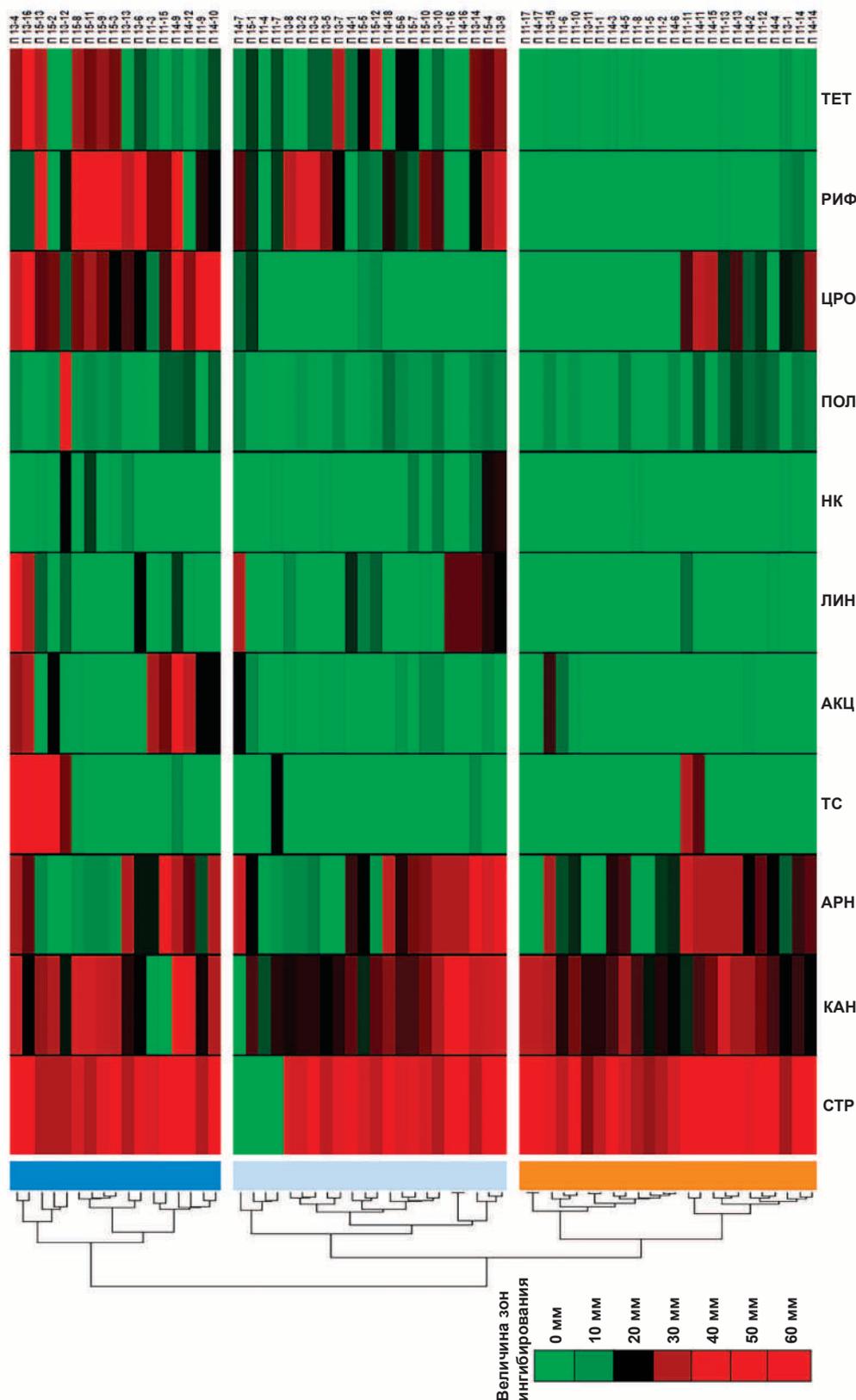


Рис. 1. Тепловая карта, отражающая различия в чувствительности/резистентности к тест-антибиотикам изолятов из различных субстратов (пояснение в тексте). Столбцы означают различные антибиотики. Красный цвет указывает на увеличение зон ингибирования (чувствительность), зелёный – на уменьшение зон ингибирования (резистентность) роста изолятов антибактериальными препаратами

Fig. 1. Heat map reflecting differences in sensitivity/resistance to test antibiotics of isolates from different substrates (explanation in the text). The columns indicate various antibiotics; red indicates an increase in inhibition zones (sensitivity), while green indicates a decrease in inhibition zones (resistance) of the growth of isolates with antibacterial drugs

бранной под буртом куриного помёта (П15). Количество штаммов, полученных из компоста (П11) и удобренной компостом почвы (П14), составило в первом кластере по 17,6%. Рост большинства культур этого кластера в сильной степени ингибировали антибиотики из группы аминогликозидов первого поколения (СТР и КАН), ЦРО, РИФ и АРН. Величина зон подавления роста стрептомицетов колебалась от 20 до 60 мм в зависимости от тест-препарата. Несколько реже отмечены штаммы с высокой чувствительностью к ТЕТ, АКЦ и ТС. Среди культур первого кластера в основном были представлены штаммы с устойчивостью не более чем к 2–4 антибиотикам одновременно, лишь один штамм (П15-2) обладал устойчивостью к пяти антибактериальным препаратам одновременно.

Вторую группу составили 23 культуры, изолированные преимущественно (69,5%) из интактной почвы (П13) и почвы, отобранной под буртом куриного помёта (П15). На долю штаммов, изолированных из компоста (П11) и почвы, удобренной компостом (П14), в этом кластере приходится 30,5%. Большинство культур второго кластера также проявили высокую чувствительность к СТР, но среди них присутствовали и устойчивые к аминогликозидам формы (П14-7). Судя по меньшим в сравнении с первым кластером диаметрам зон подавления роста (от 10 до 40 мм), культуры второй группы проявили большую устойчивость к ЦРО, ТС, АКЦ, РИФ и ТЕТ. Среди штаммов второго кластера отмечены изоляты, устойчивые одновременно к шести и более антимикробным препаратам, хотя их доля в данной выборке невысокая (13%). Применение в птицеводстве антимикробных препаратов ведёт к расширению спектра устойчивости к антибиотикам у кишечных бактерий. В популяциях *Escherichia coli*, изолированных от цыплят-бройлеров, в кормовой рацион которых добавляли противомикробные препараты, 88% изолятов обладали, по крайней мере, одним ARG, а у 42% изолятов была обнаружена множественная лекарственная устойчивость (МЛУ) [21]. Наши результаты согласуются с этими данными.

В третий кластер вошли 24 штамма, выделенные преимущественно (87,5%) из субстратов, наиболее тесно сопряжённых с куриным помётом: компоста (П11) и почвы, удобренной компостом (П14). Доля изолятов из интактной почвы (П13) в этом кластере была небольшой (12,5%). Зоны ингибирования роста большинством тест-антибиотиков

у штаммов этого кластера отсутствуют или не превышают 10 мм, что свидетельствует об устойчивости культур к данным антибактериальным препаратам. Высокую чувствительность (зоны ингибирования – 20 мм) все штаммы этого кластера продемонстрировали только к антибиотикам из группы аминогликозидов (СТР и КАН), а отдельные культуры – к АРН, ТС и ЦРО. Штаммы третьего кластера отличала меньшая (зоны ингибирования ≤ 10 мм), чем в первых двух кластерах, чувствительность к антибиотикам из групп тетрациклинов (ТЕТ), β -лактамов (АКЦ) и рифампицина (РИФ). Кроме того, доля культур с устойчивостью к шести и более препаратам одновременно (37,5%) в третьем кластере оказалась почти втрое больше, чем во втором (13%). Об увеличении относительной доли бактерий с МЛУ в удобряемых куриным помётом почвах сообщали и другие авторы. Так, в результате удобрения плантаций сахарного тростника куриным помётом 67,7% (88/130) почвенных изолятов бактерий рода *Enterococcus* spp. приобрели МЛУ, тогда как до его внесения в почву МЛУ характеризовались лишь 10% (13/130) почвенных изолятов [22].

Таким образом, изоляты из субстратов П11 и П14, тесно сопряжённых с куриным помётом, были сосредоточены в третьем кластере (21 штамм), из субстрата П15, менее тесно сопряжённого с куриным помётом, распределены между первым (6 культур) и вторым (8 культур), а изоляты, ассоциированные с интактной почвой П13 (16 культур), были представлены во всех трёх кластерах в соотношении 5 : 8 : 3. Из этого следует, что культуры стрептомицетов, выделенные из субстратов П11 и П14, обладали сходными характеристиками антибиотической устойчивости, резко отличающимися их от изолятов интактной почвы (П13) и почвы под буртом куриного помёта, ферментируемого в компост (П15). Хотя в последнем случае механического перемешивания компоста с почвой не производилось, нельзя исключить вероятность просачивания влаги сквозь субстрат, обогащённый бактериями, устойчивыми к антимикробным препаратам, и последующий горизонтальный перенос генов антибиотикорезистентности (ARG) в клетки почвенных микроорганизмов.

Наряду с анализом изменчивости зон ингибирования роста изолятов одним и тем же набором тест-антибиотиков, определяли частоту встречаемости изолятов с устойчивостью к антибактериальным препаратам в выборках

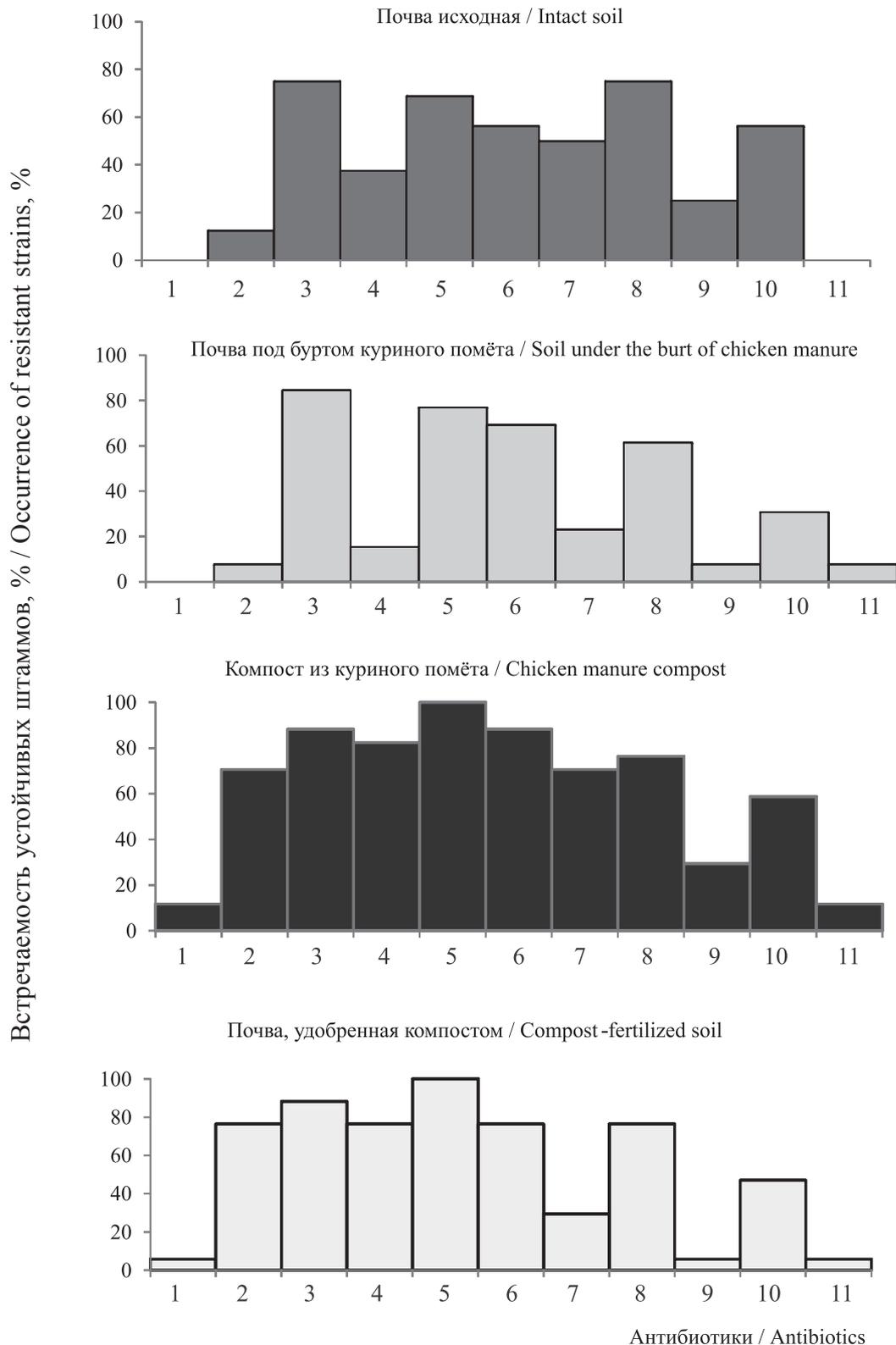


Рис. 2. Антибиотикограммы изолятов стрептомицетов из разных субстратов: 1 – kanamycin, 2 – rifampicin, 3 – trimethoprim/sulfamethoxazole, 4 – tetracycline, 5 – nalidixic acid, 6 – lincomycin, 7 – polymyxin, 8 – amoxicillin, 9 – azithromycin, 10 – ceftriaxon, 11 – streptomycin
Fig. 2. Antibioticograms of streptomycetes isolates from different substrates: 1 – kanamycin, 2 – rifampicin, 3 – trimethoprim/sulfamethoxazole, 4 – tetracycline, 5 – nalidixic acid, 6 – lincomycin, 7 – polymyxin, 8 – amoxicillin, 9 – azithromycin, 10 – ceftriaxon, 11 – streptomycin

равного объёма, полученных из каждого исследуемого субстрата. В резистоме интактной почвы встречаемость устойчивых в среднем по антибиотикам культур составила 35% (рис. 2).

В разрезе отдельных групп антибиотиков с наибольшей частотой в выборке отмечены изоляты с устойчивостью к сульфаниламидам (84,6%) и хинолонам (76,9%). Изоляты, резистентные к аминогликозидам (КАН и СТР), в интактной почве не выявлены. Антибиотический резистом в образце почвы, отобранном под буртом ферментируемого куриного помёта, отличался в сравнении с исходной почвой незначительно: встречаемость устойчивых к антибиотикам изолятов возросла до 41,5%, в выборке отмечены отдельные устойчивые к СТР штаммы (7,7%).

Более существенные отличия от резистома интактной почвы выявлены при определении антибиотической устойчивости стрептомицетов, ассоциированных с самим компостом. Встречаемость устойчивых к антибактериальным препаратам изолятов составила в среднем по антибиотикам 61,5%, т. е. была максимальной. Попарное сравнение антибиотических резистомов исследуемых субстратов с помощью U -критерия Манна-Уитни показало, что частота встречаемости устойчивых к РИФ, ТЕТ и НК форм в компосте из куриного помёта статистически значимо выше, чем в интактной почве. Эмпирические значения U -критерия Манна-Уитни ($U_{\text{эмп}}$) составили для РИФ, ТЕТ и НК соответственно 47, 65 и 87,5, при критических значениях U ($U_{\text{кр}}$), соответственно равных 71, 71 ($p \geq 0,01$) и 89 ($p \geq 0,05$).

Достоверная разница по частоте встречаемости устойчивых штаммов к некоторым из испытанных антибиотиков была обнаружена также между исходной почвой и почвой, удобренной компостом на основе ферментированного куриного помёта. Статистически значимое увеличение встречаемости устойчивых изолятов в удобренной почве отмечено в отношении тех же антибиотических препаратов: ТЕТ ($U_{\text{эмп}} = 53,5; p \geq 0,01$), РИФ ($U_{\text{эмп}} = 62; p \geq 0,01$) и НК ($U_{\text{эмп}} = 76,5; p \geq 0,05$). В среднем по препаратам встречаемость устойчивых изолятов составила в удобренной почве 53,5%.

Заключение

Таким образом, антибиотические резистомы компоста из куриного помёта и удобренной им почвы проявили между собой по рассмотренным характеристикам высокое сходство, тогда как резистом почвы, отобран-

ной под буртом куриного помёта, значительно отличался от них и был ближе к резистому интактной почвы.

Сочетание в оценке антибиотических резистомов двух критериев – изменчивости зон ингибирования роста изолятов антибактериальными препаратами и частоты встречаемости в выборках равного объёма изолятов с устойчивостью к этим же препаратам, позволило выявить антибиотики, устойчивость к которым среди почвенных бактерий рода *Streptomyces* статистически достоверно возросла в связи с использованием компоста из куриного помёта. Это – тетрациклины, рифампицины и налидиксовая кислота (группа хинолонов). В литературе ранее отмечалось, что применение птичьего помёта в качестве органического удобрения приводит к увеличению частоты встречаемости в почве генов устойчивости к тетрациклинам и β -лактамам [23]. Наши результаты совпадают с предыдущими данными в отношении тетрациклина, как препарата из наиболее широко используемого класса антибиотиков в ветеринарии и медицине. Различия в отношении других классов антибиотиков, скорее всего, обусловлены спектром конкретных препаратов, применяемых на том или ином птицеводческом предприятии.

Известно, что антибиотики используются для лечения или профилактики заболеваний у 60–80% домашнего скота в США [24]. В Китае сельское хозяйство и животноводство потребляют не менее 100,8 тыс. т антибиотиков ежегодно [25]. В России животные ежегодно употребляют около 3,5 тыс. т антибиотиков, из них 23% – для лечения и профилактики, 19% – в качестве стимуляторов роста, 36% – как противопаразитарные препараты, 22% – как профилактические средства [26]. Препараты антибиотиков, введённые в рацион птицы, оказывают стимулирующее действие на её рост, яйценоскость и эффективное использование корма [27]. Вместе с тем, внесение в почву удобрительных компостов, приготовленных на основе отходов птицеводства и животноводства, может способствовать обогащению почвенного микробиома бактериями, устойчивыми к антибиотикам, широко используемым в ветеринарии, создавая экологический резервуар устойчивости к противомикробным препаратам с потенциальными рисками для здоровья человека и ОС.

В связи с этим целесообразно в рационах кормления животных заменять, по возможности, антибиотики на ростстимулирующие

кормовые добавки, фитобиотики, пробиотические и пребиотические препараты [28, 29]. Безопасные добавки на основе полезных микроорганизмов и биологически активных веществ растительного происхождения оказывают положительное воздействие на здоровье и сохранность поголовья, показатели продуктивности и качество продукции [27].

Кроме того, при использовании птичьего помёта для удобрения сельскохозяйственных почв необходимо придерживаться определённых правил организации агроландшафта. Так, при использовании для удобрения подстилки с птицеферм в недавней работе была показана высокая эффективность в снижении рисков миграции ARG в сточных водах разделительных буферных полос с подсевом местных степных трав [30]. Наличие аналогичных буферов из травы *Panicum virgatum* L. снизило содержание ARG в сточных водах после внесения свиного навоза [31]. Таким образом, создание узких полос из местных трав и разнотравья в объёме 5–25% от общей площади полей сельскохозяйственного назначения можно рассматривать как природоохранную практику и реальную перспективу в улучшении качества ОС в агроэкосистемах в связи с использованием органических удобрений на основе животноводческих отходов.

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. Лысенко В.П. Куриный помёт – побочная продукция птицефабрик // Птица и птицепродукты. 2013. № 5. С. 65–67.
2. Агафонов Е.В., Каменев Р.А., Ефремов В.А., Манашов Д.А., Бельгин А.А., Громаков А.А., Турчин В.В., Иванов С.М. Использование птичьего помёта в земледелии Ростовской области. Научно-практические рекомендации. Персиановский: Изд-во Донского ГАУ, 2016. 86 с.
3. Heuer H., Solehati Q., Zimmerling U., Kleineidam K., Schloter M., Müller T., Focks A., Thiele-Bruhn S., Smalla K. Accumulation of sulfonamide resistance genes in arable soils due to repeated application of manure containing sulfadiazine // Applied and Environmental Microbiology. 2011. V. 77. No. 7. P. 2527–2530. doi: 10.1128/AEM.02577-10
4. Merchant L.E., Rempel H., Forge T., Kannangara T., Bittman S., Delaquis P., Topp E., Ziebell K.A., Diarra M.S.

Characterization of antibiotic-resistant and potentially pathogenic *Escherichia coli* from soil fertilized with litter of broiler chickens fed antimicrobial-supplemented diets // Canadian Journal of Microbiology. 2012. V. 58. No. 9. P. 1084–1098.

5. Hammerum A.M., Lester C.H., Heuer O.E. Antimicrobial-resistant enterococci in animals and meat: A human health hazard? // Foodborne Pathogens and Disease. 2010. V. 7. No. 10. P. 1137–1146.

6. Marshall B.M., Levy S.B. Food animals and antimicrobials: Impacts on human health // Clinical Microbiology Reviews. 2011. V. 24. No. 4. P. 718–733.

7. Global antimicrobial resistance and use surveillance system (GLASS) report: 2022 [Электронный ресурс] <https://publichealthupdate.com/global-antimicrobial-resistance-and-use-surveillance-system-glass-report-2022/> (Дата обращения: 14.12.2022).

8. Zhou N., Cheng Z., Zhang X., Lv C., Guo C., Liu H., Zhu Y. Global antimicrobial resistance: a system-wide comprehensive investigation using the Global One Health Index // Infectious diseases of poverty. 2022. V. 11. No. 1. P. 1–16.

9. Aljeldah M.M. Antimicrobial resistance and its Spread is a global threat // Antibiotics. 2022. V. 11. No. 8. Article No. 1082.

10. Супотницкий М.В. Механизмы развития резистентности к антибиотикам у бактерий // Биопрепараты. 2011. № 2. С. 4–44.

11. Kozhevin P.A., Vinogradova K.A., Bulgakova V.G. The soil antibiotic resistome // Moscow University Soil Science Bulletin. 2013. V. 68. No. 2. P. 53–59.

12. D’Costa V.M., King C.E., Kalan L., Morar M., Sung W.W., Schwarz C., Froese D., Zazula G., Calmels F., Debruyne R., Golding G.B., Poinar H.N., Wright G.D. Antibiotic resistance is ancient // Nature. 2011. V. 477. No. 7365. P. 457–461.

13. Allen H.K., Donato J., Wang H.H., Cloud-Hansen K.A., Davies J., Handelsman J. Call of the wild: antibiotic resistance genes in natural environments // Nature Reviews Microbiology. 2010. V. 8. No. 4. P. 251–259.

14. Wang F., Xu M., Stedtfeld R.D., Sheng H., Fan J., Liu M., Tiedje J.M. Long-term effect of different fertilization and cropping systems on the soil antibiotic resistome // Environmental Science & Technology. 2018. V. 52 No. 22. P. 13037–13046.

15. Qing L., Qigen D., Jian H., Hongjun W., Jingdu Ch. Profiles of tetracycline resistance genes in paddy soils with three different organic fertilizer applications // Environmental Pollution. 2022. V. 306. Article No. 119368.

16. Cui E., Wu Y., Zuo Y., Chen H. Effect of different biochars on antibiotic resistance genes and bacterial community during chicken manure composting // Bioresour. Technol. 2016. V. 20. P. 11–17.

17. Fatahi-Bafghi M. Antibiotic resistance genes in the Actinobacteria phylum // Eur. J. Clin. Microbiol. Infect. Dis. 2019. V. 38. P. 1599–1624.

18. Kaur P., Peterson E. Antibiotic resistance mechanisms in bacteria: relationships between resistance determinants of antibiotic producers, environmental bacteria, and clinical pathogens // *Frontiers in Microbiology*. 2018. V. 9. Article No. 2928.

19. Гаузе Г.Ф., Преображенская Т.П., Свешникова М.А., Терехова Л.П., Максимова Т.С. Определитель актиномицетов. Роды *Streptomyces*, *Streptoverticillium*, *Chainia*. М.: Наука, 1983. 248 с.

20. Ryan M.C., Stucky M., Wakefield C., Melott J.M., Akbani R., Weinstein J.N., Broom B.M. Interactive clustered heat map builder: An easy web-based tool for creating sophisticated clustered heat maps // *F1000Research*. 2019. V. 8. Article No. 1750.

21. Bonnet C., Diarrassouba F., Brousseau R., Masson L., Topp E., Diarra M.S. Pathotype and antibiotic resistance gene distributions of *Escherichia coli* isolates from broiler chickens raised on antimicrobial-supplemented diets // *Applied and Environmental Microbiology*. 2009. V. 75. No. 22. P. 6955–6962.

22. Fatoba D.O., Abia A.L.K., Amoako D.G., Essack S.Y. Rethinking manure application: Increase in multidrug-resistant *Enterococcus* spp. in agricultural soil following chicken litter application // *Microorganisms*. 2021. V. 9. No. 5. Article No. 885.

23. Merchant L.E., Rempel H., Forge T., Kannangara T., Bittman S., Delaquis P., Topp E., Ziebell K.A., Diarra M.S. Characterization of antibiotic-resistant and potentially pathogenic *Escherichia coli* from soil fertilized with litter of broiler chickens fed antimicrobial-supplemented diets // *Canadian Journal of Microbiology*. 2012. V. 58. No. 9. P. 1084–1098.

24. Literature review of contaminants in livestock and poultry manure and implications for water quality (EPA 820-R-13-002). Washington, DC: United States Environmental Protection Agency, 2013. 137 p.

25. Zhou L.J., Ying G.G., Liu S., Zhang R.Q., Lai H.J., Chen Z.F. Excretion masses and environmental occurrence of antibiotics in typical swine and dairy cattle farms in China // *Sci. Total Environ*. 2013. V. 444. P. 183–195.

26. Капитонова Е.А., Гласкович М.А., Кузьменко П.М., Гласкович С.А., Соболев Б.Н. Современное состояние и проблемы применения антибиотиков в сельском хозяйстве // *Учёные записки УО ВГАВМ*. 2011. Т. 47. Вып. 2. С. 284–288 [Электронный ресурс] <http://repo.vsavm.by/handle/123456789/704> (Дата обращения: 24.01.2023).

27. Шацких Е.В., Галиев Д.М., Нуфер А.И. Мясная продуктивность цыплят-бройлеров при замене кормовых антибиотиков в рационе на ростостимулирующие кормовые добавки // *Птица и птицепродукты*. 2019. № 6. С. 26–29.

28. Фисинин В.И., Егоров И.А., Лаптев Г.Ю., Ленкова Т.Н., Никонов И.Н., Ильина Л.А., Манукян В.А., Грозина А.А., Егорова Т.А., Новикова Н.И., Ёлдырым Е.А. Получение продукции птицеводства без антибиотиков с использованием перспективных программ кормления на основе пробиотических препаратов // *Вопросы питания*. 2017. № 6. С. 114–124.

29. Васильева О.А., Нуфер А.И., Шацких Е.В. Альтернативные пути замены кормовых антибиотиков // *Эффективное животноводство*. 2019. № 4. С. 13–15 [Электронный ресурс] <https://cyberleninka.ru/article/n/alternativnye-puti-zameny-kormovyh-antibiotikov> (Дата обращения: 24.01.2023).

30. Flater J.S., Alt L.M., Soupir M., Moorman T.B., Howe A. Prairie strips' effect on transport of antimicrobial resistance indicators in poultry litter // *Journal of Environmental Quality*. 2022. V. 51. No. 2. P. 260–271.

31. Soni B., Bartelt-Hunt S.L., Snow D.D., Gilley J.E., Woodbury B.L., Marx D.B., Li X. Narrow grass hedges reduce tylosin and associated antimicrobial resistance genes in agricultural runoff // *Journal of Environment Quality*. 2015. V. 44. No. 3. P. 895–902.

References

1. Lysenko V.P. Chicken droppings – by-products of poultry farms // *Ptitsa i ptitseprodukty*. 2013. No. 5. P. 65–67 (in Russian).

2. Agafonov E.V., Kamenev R.A., Efremov V.A., Manashov D.A., Belgin A.A., Gromakov A.A., Turchin V.V., Ivanov S.M. The use of bird droppings in agriculture of the Rostov region: scientific and practical recommendations. *Persianovskiy: Izd-vo Donskogo GAU*, 2016. 86 p. (in Russian).

3. Heuer H., Solehati Q., Zimmerling U., Kleinedam K., Schloter M., Müller T., Focks A., Thiele-Bruhn S., Smalla K. Accumulation of sulfonamide resistance genes in arable soils due to repeated application of manure containing sulfadiazine // *Applied and Environmental Microbiology*. 2011. V. 77. No. 7. P. 2527–2530. doi: 10.1128/AEM.02577-10

4. Merchant L.E., Rempel H., Forge T., Kannangara T., Bittman S., Delaquis P., Topp E., Ziebell K.A., Diarra M.S. Characterization of antibiotic-resistant and potentially pathogenic *Escherichia coli* from soil fertilized with litter of broiler chickens fed antimicrobial-supplemented diets // *Canadian Journal of Microbiology*. 2012. V. 58. No. 9. P. 1084–1098. doi: 10.1139/w2012-082

5. Hammerum A.M., Lester C.H., Heuer O.E. Antimicrobial-resistant enterococci in animals and meat: A human health hazard? // *Foodborne Pathogens and Disease*. 2010. V. 7. No. 10. P. 1137–1146. doi: 10.1089/fpd.2010.0552

6. Marshall B.M., Levy S.B. Food animals and antimicrobials: Impacts on human health // *Clinical Microbiology Reviews*. 2011. V. 24. No. 4. P. 718–733. doi: 10.1128/CMR.00002-11

7. Global antimicrobial resistance and use surveillance system (GLASS) report: 2022 [Internet resource] <https://publichealthupdate.com/global-antimicrobial-resistance-and-use-surveillance-system-glass-report-2022/> (Accessed: 14.12.2022).

8. Zhou N., Cheng Z., Zhang X., Lv C., Guo C., Liu H., Zhu Y. Global antimicrobial resistance: a system-wide comprehensive investigation using the Global One Health Index // *Infectious diseases of poverty*. 2022. V. 11. No. 1. P. 1–16. doi: 10.1186/s40249-022-01016-5

9. Aljeldah M.M. Antimicrobial resistance and its Spread is a global threat // *Antibiotics*. 2022. V. 11. No. 8. Article No. 1082. doi: 10.3390/antibiotics11081082
10. Supotnitsky M.V. Mechanisms of development of resistance to antibiotics in bacteria // *Biopreparaty*. 2011. No. 2. P. 4–44 (in Russian).
11. Kozhevnikov P.A., Vinogradova K.A., Bulgakova V.G. The soil antibiotic resistome // *Moscow University Soil Science Bulletin*. 2013. V. 68. No. 2. P. 53–59. doi: 10.3103/S014768741302004X
12. D'Costa V.M., King C.E., Kalan L., Morar M., Sung W.W., Schwarz C., Froese D., Zazula G., Calmels F., Debruyne R., Golding G.B., Poinar H.N., Wright G.D. Antibiotic resistance is ancient // *Nature*. 2011. V. 477. No. 7365. P. 457–461. doi: 10.1038/nature10388
13. Allen H.K., Donato J., Wang H.H., Cloud-Hansen K.A., Davies J., Handelsman J. Call of the wild: antibiotic resistance genes in natural environments // *Nature Reviews Microbiology*. 2010. V. 8. No. 4. P. 251–259. doi: 10.1038/nrmicro2312
14. Wang F., Xu M., Stedtfeld R.D., Sheng H., Fan J., Liu M., Tiedje J.M. Long-term effect of different fertilization and cropping systems on the soil antibiotic resistome // *Environmental Science & Technology*. 2018. V. 52. No. 22. P. 13037–13046. doi: 10.1021/acs.est.8b04330
15. Qing L., Qigen D., Jian H., Hongjun W., Jingdu Ch. Profiles of tetracycline resistance genes in paddy soils with three different organic fertilizer applications // *Environmental Pollution*. 2022. V. 306. Article No. 119368. doi: 10.1016/j.envpol.2022.119368
16. Cui E., Wu Y., Zuo Y., Chen H. Effect of different biochars on antibiotic resistance genes and bacterial community during chicken manure composting // *Bioresour. Technol.* 2016. V. 20. P. 11–17. doi: 10.1016/j.biortech.2015.12.030
17. Fatahi-Bafghi M. Antibiotic resistance genes in the Actinobacteria phylum // *Eur. J. Clin. Microbiol. Infect. Dis.* 2019. V. 38. P. 1599–1624. doi: 10.1007/s10096-019-03580-5
18. Kaur P., Peterson E. Antibiotic resistance mechanisms in bacteria: relationships between resistance determinants of antibiotic producers, environmental bacteria, and clinical pathogens // *Frontiers in Microbiology*. 2018. V. 9. Article No. 2928. doi: 10.3389/fmicb.2018.02928
19. Gause G.F., Preobrazhenskaya T.P., Sveshnikova M.A., Terekhova L.P., Maksimova T.S. Determinant of actinomycetes. The genera *Streptomyces*, *Streptoverticillium*, *Chainia*. Moskva: Nauka, 1983. 248 p. (in Russian).
20. Ryan M.C., Stucky M., Wakefield C., Melott J.M., Akbani R., Weinstein J.N., Broom B.M. Interactive clustered heat map builder: An easy web-based tool for creating sophisticated clustered heat maps // *F1000Research*. 2019. V. 8. Article No. 1750. doi: 10.12688/f1000research.20590.2
21. Bonnet C., Diarrassouba F., Brousseau R., Masson L., Topp E., Diarra M.S. Pathotype and antibiotic resistance gene distributions of *Escherichia coli* isolates from broiler chickens raised on antimicrobial-supplemented diets // *Applied and Environmental Microbiology*. 2009. V. 75. No. 22. P. 6955–6962. doi: 10.1128/AEM.00375-09
22. Fatoba D.O., Abia A.L.K., Amoako D.G., Es-sack S.Y. Rethinking manure application: Increase in multidrug-resistant *Enterococcus* spp. in agricultural soil following chicken litter application // *Microorganisms*. 2021. V. 9. No. 5. Article No. 885. doi: 10.3390/microorganisms9050885
23. Merchant L.E., Rempel H., Forge T., Kannangara T., Bittman S., Delaquis P., Topp E., Ziebell K.A., Diarra M.S. Characterization of antibiotic-resistant and potentially pathogenic *Escherichia coli* from soil fertilized with litter of broiler chickens fed antimicrobial-supplemented diets // *Canadian Journal of Microbiology*. 2012. V. 58. No. 9. P. 1084–1098. doi: 10.1139/w2012-082
24. Literature review of contaminants in livestock and poultry manure and implications for water quality (EPA 820-R-13-002). Washington, DC: United States Environmental Protection Agency, 2013. 137 p.
25. Zhou L.J., Ying G.G., Liu S., Zhang R.Q., Lai H.J., Chen Z.F. Excretion masses and environmental occurrence of antibiotics in typical swine and dairy cattle farms in China // *Sci. Total Environ.* 2013. V. 444. P. 183–195.
26. Kapitonova E.A., Glaskovich M.A., Kuzmenko P.M., Glaskovich S.A., Sobolev B.N. The current state and problems of the use of antibiotics in agriculture // *Uchenyye zapiski UO VGAVM*. 2011. V. 47. No. 2. P. 284–288 [Internet resource] <http://repo.vsavm.by/handle/123456789/704> (Accessed: 24.01.2023) (in Russian).
27. Shatskikh E.V., Galiev D.M., Nufer A.I. Meat productivity of broiler chickens when replacing feed antibiotics in the diet with growth-stimulating feed additives // *Ptitsa i ptitseprodukty*. 2019. No. 6. P. 26–29 (in Russian).
28. Fisinin V.I., Egorov I.A., Laptev G. Yu., Lenkova T.N., Nikonov I.N., Ilyina L.A., Manukyan V.A., Grozina A.A., Egorova T.A., Novikova N.I., Yildirim E.A. Obtaining poultry products without antibiotics using promising feeding programs based on probiotic preparations // *Voprosy pitaniya*. 2017. No. 6. P. 114–124 (in Russian).
29. Vasil'eva O.A., Nufer A.I., Shatskikh E.V. Alternative ways to replace feed antibiotics // *Efektivnoye zhivotnovodstvo*. 2019. No. 4. P. 13–15 [Internet resource] <https://cyberleninka.ru/article/n/alternativnye-puti-zameny-kormovyh-antibiotikov> (Accessed: 24.01.2023).
30. Flater J.S., Alt L.M., Soupir M., Moorman T.B., Howe A. Prairie strips' effect on transport of antimicrobial resistance indicators in poultry litter // *Journal of Environmental Quality*. 2022. V. 51. No. 2. P. 260–271. doi: 10.1002/jeq2.20333
31. Soni B., Bartelt-Hunt S.L., Snow D.D., Gilley J.E., Woodbury B.L., Marx D.B., Li X. Narrow grass hedges reduce tylosin and associated antimicrobial resistance genes in agricultural runoff // *Journal of Environment Quality*. 2015. V. 44. No. 3. P. 895–902. doi: 10.2134/jeq2014.09.0389

Оценка засорённости посевов пшеницы по геоботаническим, наземным спектрометрическим и спутниковым данным

© 2023. Т. И. Письман¹, к. б. н., с. н. с., И. Ю. Ботвич¹, м. н. с., М. Г. Ерунова², к. т. н., с. н. с., Д. В. Емельянов¹, аспирант, Н. А. Огородов², м. н. с., А. А. Шпедт³, д. с.-х. н., г. н. с., А. П. Шевырногов¹, д. т. н., г. н. с., зав. лабораторией,
¹Институт биофизики СО РАН, 660036, Россия, г. Красноярск, Академгородок, д. 50–50,
²ФИЦ «Красноярский научный центр СО РАН», 660036, Россия, г. Красноярск, Академгородок, д. 50,
³Красноярский НИИСХ ФИЦ КНЦ СО РАН, 660041, Россия, г. Красноярск, пр. Свободный, д. 66,
 e-mail: irina.pugacheva@mail.ru, tpisman@mail.ru

В работе описана возможность использования данных наземного спектрометрирования и спутниковых снимков группировки PlanetScope высокого пространственного разрешения для оценки засорённости посевов зерновых культур. Для дешифрирования космических снимков использовали вегетационный индекс NDVI (Normalized Difference Vegetation Index). Биологическая оценка степени засорённости посевов определялась по четырехбалльной шкале. В результате мониторинга посевов пшеницы на территории Красноярского НИИСХ ФИЦ КНЦ СО РАН вблизи п. Минино (Средняя Сибирь, Красноярский край) выявлено влияние сорной растительности на величину NDVI сельскохозяйственных посевов. Усреднённый NDVI для посевов пшеницы с низкой степенью засорённости выше NDVI посевов пшеницы с высокой степенью засорённости. На основании спутниковых данных построены карты пространственного распределения индекса NDVI в разное время периода вегетации (09.07.2019 и 02.08.2019). На них достоверно выявлены участки посевов пшеницы с разным количеством сорняков. Показана возможность дешифрирования посевов пшеницы с разной степенью засорённости по наземным спектрометрическим и спутниковым данным.

Ключевые слова: пшеница, засорённость, PlanetScope, NDVI, наземное спектрометрирование, коэффициент спектральной яркости.

Wheat crops weediness assessment based on geobotanical, ground and satellite spectral data

© 2023. T. I. Pisman¹ ORCID: 0000-0001-8951-4662, I. Y. Botvich¹ ORCID: 0000-0001-7359-4514, M. G. Erunova² ORCID: 0000-0002-1922-1036, D. V. Emelyanov¹ ORCID: 0000-0002-0752-3512, N. A. Ogorodov² ORCID: 0000-0001-7077-8529, A. A. Shpedt³ ORCID: 0000-0001-7143-1252, A. P. Shevyrnogov¹ ORCID: 0000-0001-8019-704X,
¹Institute of Biophysics SB RAS, 50–50, Akademgorodok, Krasnoyarsk, Russia, 660036,
²Federal Research Center “Krasnoyarsk Science Center of SB RAS”, 50, Akademgorodok, Krasnoyarsk, Russia, 660036,
³Krasnoyarsk Agricultural Research Institute of Federal Research Center “Krasnoyarsk Science Center of SB RAS”, 66, Svobodnyi Prospekt, Krasnoyarsk, Russia, 660041,
 e-mail: irina.pugacheva@mail.ru, tpisman@mail.ru

The paper describes the possibility of using land spectrometry data and high-resolution satellite images of the PlanetScope grouping to assess weediness of cereal crops. The objects of monitoring were on the territory of the Krasnoyarsk Agricultural Research Institute of Federal Research Center “Krasnoyarsk Science Center of SB RAS” (Middle Siberia, Krasnoyarsk region). For interpretation satellite images, the NDVI (Normalized Difference Vegetation Index)

vegetation index was used. Biological assessment of the degree of crops weediness was determined on a four-level scale. As the result of monitoring wheat crops the influence of weed vegetation on the value of NDVI of agricultural crops was revealed. The average NDVI for wheat planting with a low degree of weediness is higher than the NDVI of wheat plantings with a high degree of weediness. As the result of the analysis of the spectra of cultural and weed vegetation on July 09, 2019, a difference in the value of the spectral brightness coefficient in the near-infrared region was noted, which is mainly connected with different structure of plants. For wheat planting with a strong degree of weediness (3 level) in the near-infrared region, the spectral brightness coefficient reaches 50%, while with a weak degree of weediness (1 level) below 40%. The NDVI analysis of wheat plantings with different levels of weediness during the whole vegetation period showed the same dynamics. However, for fields with a low degree of weediness, the NDVI value reaches 0.5 in the middle of the growing season, while for fields with a high degree of weediness, the NDVI value reaches only 0.35. According to the satellite data, spatial distribution maps of NDVI were constructed in different time of growing season (July 09, 2019 and August 02, 2019). The areas of wheat plantings with different degrees of weediness are reliably revealed on them.

Keywords: wheat, weediness, PlanetScope, NDVI, land spectral measurement, spectral brightness coefficient.

Высокая культура земледелия – необходимое условие повышения урожайности любых сельскохозяйственных культур. Одним из важнейших резервов повышения продуктивности сельскохозяйственных культур является оценка санитарного состояния полей и очищение их от сорных растений [1].

Засорённость посевов – большая проблема, особенно при низком уровне агротехники и недостатке средств у фермеров на приобретение гербицидов. Тип засорённости, распространённость сорняков в посевах, их фенология имеют значительную сезонную изменчивость из-за особенностей годовых метеорологических условий, севооборотов возделываемых культур, почвенных условий, особенности агротехники [2].

При решении подобных вопросов наиболее эффективным средством (особенно на уровне отдельных регионов и стран) служит использование технологий спутникового мониторинга [3, 4]. В большинстве случаев спутниковые данные используются для мониторинга сельскохозяйственных угодий, для оценки площадей посевов сельскохозяйственных культур и их состояния, а также для прогнозирования их урожайности [5].

Среди задач текущего контроля состояния посевов сельскохозяйственных культур по данным дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) особое место занимает оценка санитарного состояния посевов, т. е. выявление факта засорённости культуры сорняками.

Как правило, для этих задач применяется методика определения различий в спектральной плотности энергетической яркости (СПЭЯ) растительности в течение вегетационного периода и изображений индексов NDVI (Normalized Difference Vegetation Index) полей, по которым можно судить об их состоянии [6, 7]. Индекс NDVI широко используется для анализа состояния растительности [8, 9], включая посевы сельскохозяйственных культур [10].

Целью работы является оценка засорённости посевов пшеницы по наземным спектрометрическим и спутниковым данным PlanetScope в течение вегетационного сезона.

Объекты и методы исследования

Объектом исследования являются посевы сельскохозяйственных культур на территории Красноярского НИИСХ ФИЦ КНЦ СО РАН вблизи п. Минино (Средняя Сибирь, Красноярский край). Исследованы посевы яровой пшеницы Свирель (*Triticum vulgare*) с разной степенью засорённости на участках № 22 и № 23 (рис. 1) за вегетационный период 2019 г. Для оценки степени засорённости использованы геоботанические, наземные спектрометрические и спутниковые данные PlanetScope.

Для биологической оценки степени засорения посевов зерновых культур используется визуальный метод учёта сорняков. Он заключается в том, что исследуемое поле проходят по диагонали и через равные промежутки регистрируют сорняки всех видов. Данные наблюдений оценивают по четырехбалльной шкале: 1 балл – слабая степень засорения, сорняки встречаются единично (до 5% от числа культурных растений); 2 балла – средняя степень засорения, сорняки заметны среди культурных растений (до 25%); 3 балла – сильная степень засорения, количество сорняков близко к числу культурных растений (до 50%); 4 балла – очень сильная степень засорения, количество сорняков такое же или больше, чем культурных растений, и рост последних сильно подавлен.

Отражательные спектральные свойства природных объектов принято выражать коэффициентом спектральной яркости (КСЯ). Наземные измерения коэффициентов спектральной яркости проводили одновременно с геоботаническими исследованиями 09.07.2019. Для проведения наземной спектрометрии использовали полевой спектрометрический

комплекс, состоящий из полевого портативного спектрорадиометра Spectral Evolution PSR-1100F, портативного компьютера PDA GETAC, калибровочного отражающего эталона (Spectral Evolution), цифрового фотоаппарата и соответствующего программного обеспечения [11, 12]. С помощью данного комплекса проводили измерения коэффициента спектральной яркости объекта в диапазоне от 320 до 1100 нм. Полученные спектры имеют привязку к координатам местности по GPS, высоте местности, обеспечены соответствующей фотосъёмкой и голосовыми заметками. Измерения КСЯ посевов пшеницы выполняли с 11 до 15 часов местного времени, что на широте проводимых работ обеспечивало достаточные условия освещения объектов.

Для дешифрирования сельскохозяйственных посевов с различной степенью засорённости использовали спутниковые данные PlanetScore. Крупнейшая группировка спутников компании PlanetScore предоставляет данные высокого пространственного разрешения (3 м) на ежедневной основе со спутников Dove [13]. Спектральные каналы представлены четырьмя диапазонами: 455–515, 500–590, 590–670, 780–860 нм.

Для расчёта NDVI по спутниковым данным PlanetScore проведено формирование набора ортотрансформированных снимков в Онлайн-сервисе Planet Explorer за вегетационный период 2019 г., выбирали «безоблачные данные». В каждом полученном снимке все спектральные каналы имеют свои (индивидуальные) калибровочные коэффициенты. В программе ГИС QGIS через модуль «Калькулятор растров» для каждого снимка рассчитывали спектральный индекс NDVI с учётом

индивидуальных коэффициентов. Если территория состоит из нескольких снимков, то снимки сшивали в «единый» растр.

Цифровая карта сельскохозяйственных полей и набор NDVI-снимков за 2019 г. позволили получить статистические значения NDVI для каждого поля в течение всего вегетационного периода [14].

По наземным спектрометрическим и спутниковым данным рассчитан нормализованный разностный индекс растительности (Normalized Difference Vegetation Index – NDVI). Значения NDVI рассчитывали по формуле (1):

$$NDVI = (NIR - RED) / (NIR + RED), \quad (1)$$

где RED – КСЯ в красной части видимого диапазона, NIR – КСЯ ближнего ИК-излучения. Для зелёной растительности индекс NDVI обычно принимает значения от 0,2 до 0,8.

Результаты и обсуждение

Сорные растения или сорняки – дикорастущие растения, обитающие на землях, используемых в качестве сельскохозяйственных угодий. Вред, который наносят сорняки, связан как со снижением урожайности, так и с ухудшением качества сельскохозяйственной продукции. Культурные и сорные растения конкурируют друг с другом за воду, свет, питательные вещества и т. д.

На рисунке 1 (см. цв. вкладку III) представлена карта расположения участков посевов яровой пшеницы и участков без посева с различной степенью засорённости на участках 22 и 23,

Таблица / Table
Виды сорняков, встречающиеся на полях с разной степенью засорённости
Weed species found in fields with different degrees of weediness

Виды сорняков Weed species	Число участков, в которых встречается сорняк The number of points at which weed occurs
Просо сорнополевое / Millet weed (<i>Panicum capillare</i> L.)	15
Осот розовый / Canada Thistle (<i>Cirsium arvense</i> L.)	16
Марь белая / White goosefoot (<i>Chenopodium album</i> L.)	5
Осот жёлтый / Thistle common sow (<i>Sonchus arvensis</i> L.)	9
Липучка оттопыренная / Two-row Stickseed (<i>Lappula myosotis</i> Moench.)	4
Конопля сорная / Hemp ruderal (<i>Cannabis ruderalis</i> Janisch.)	7
Ширица запрокинутая / Red-root amaranth (<i>Amaranthus retroflexus</i> L.)	4
Овсяг обыкновенный / Wild oat (<i>Avena fatua</i> L.)	4
Одуванчик обыкновенный / Dandelion (<i>Taraxacum vulgare</i> (L.) Webb ex F.Y. Wigg.)	1

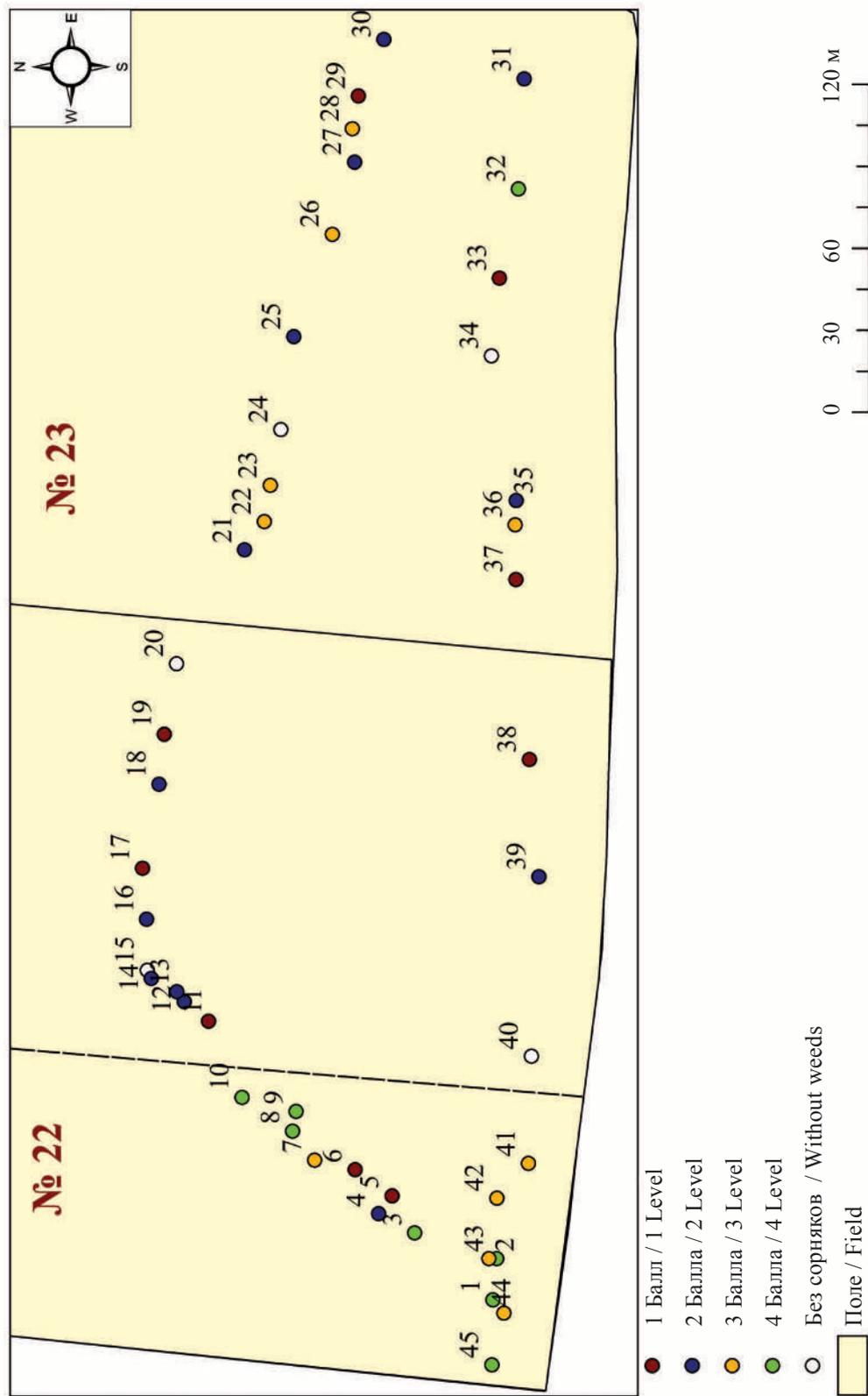


Рис. 1. Карта расположения участков с разной степенью засорённости полей, засеянных пшеницей (№ 11–40), и не засеянных (№ 1–10 и № 41–45)
Fig. 1. Map of the points location with varying degrees of weediness in fields sown with wheat (No. 11–40) and non-sown (No. 1–10 and No. 41–45)

Т. И. Письман, И. Ю. Ботвич, М. Г. Ерунова, Д. В. Емельянов,
Н. А. Огородов, А. А. Шпедт, А. П. Шевырногов
«Оценка засорённости посевов пшеницы по геоботаническим,
наземным спектрометрическим и спутниковым данным». С. 110.

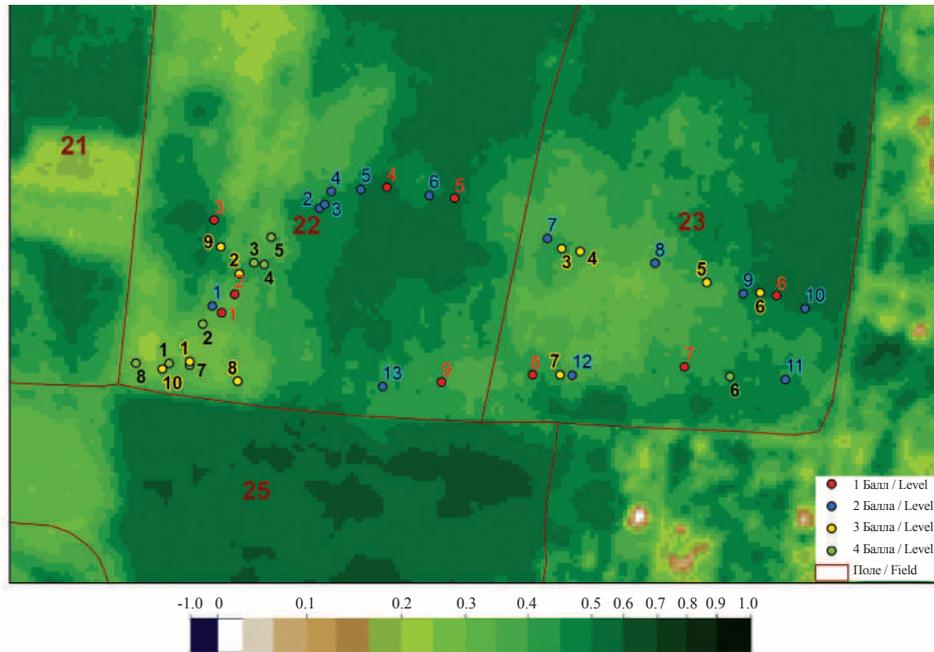


Рис. 4. Карта пространственного распределения NDVI посевов пшеницы с разной степенью засорённости за 09.07.2019 по спутниковым данным PlanetScore
Fig. 4. Map of the spatial distribution of NDVI wheat crops with different degrees of weediness for 07.09.2019 according to satellite data from PlanetScore

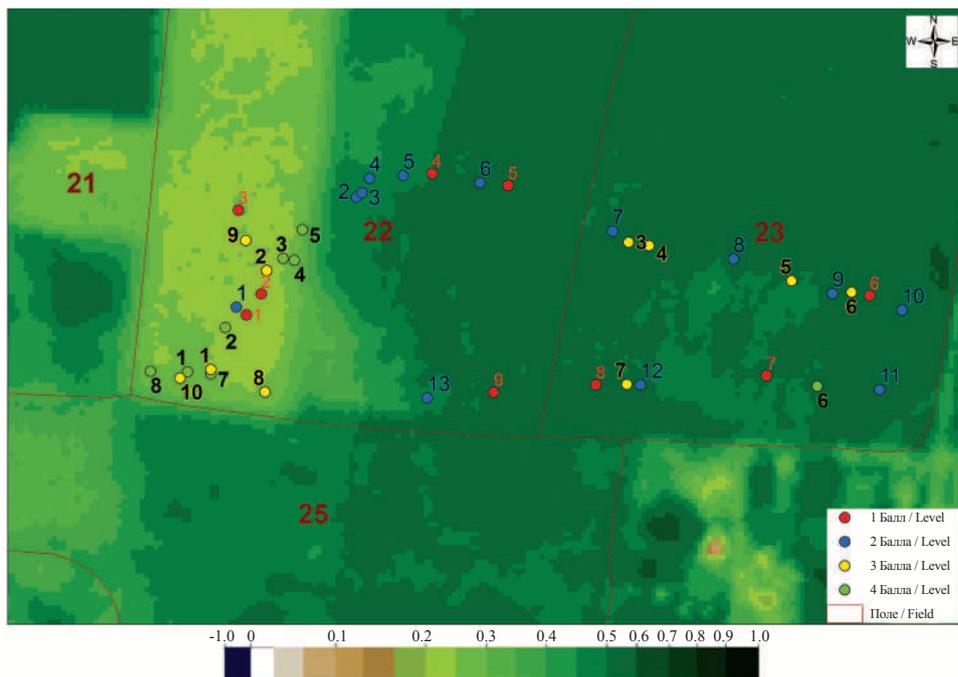


Рис. 5. Карта пространственного распределения NDVI посевов пшеницы с разной степенью засорённости за 02.08.2019 по спутниковым данным PlanetScore
Fig. 5. Map of the spatial distribution of NDVI wheat crops with varying degrees of weediness for 08.02.2019 according to satellite data from PlanetScore

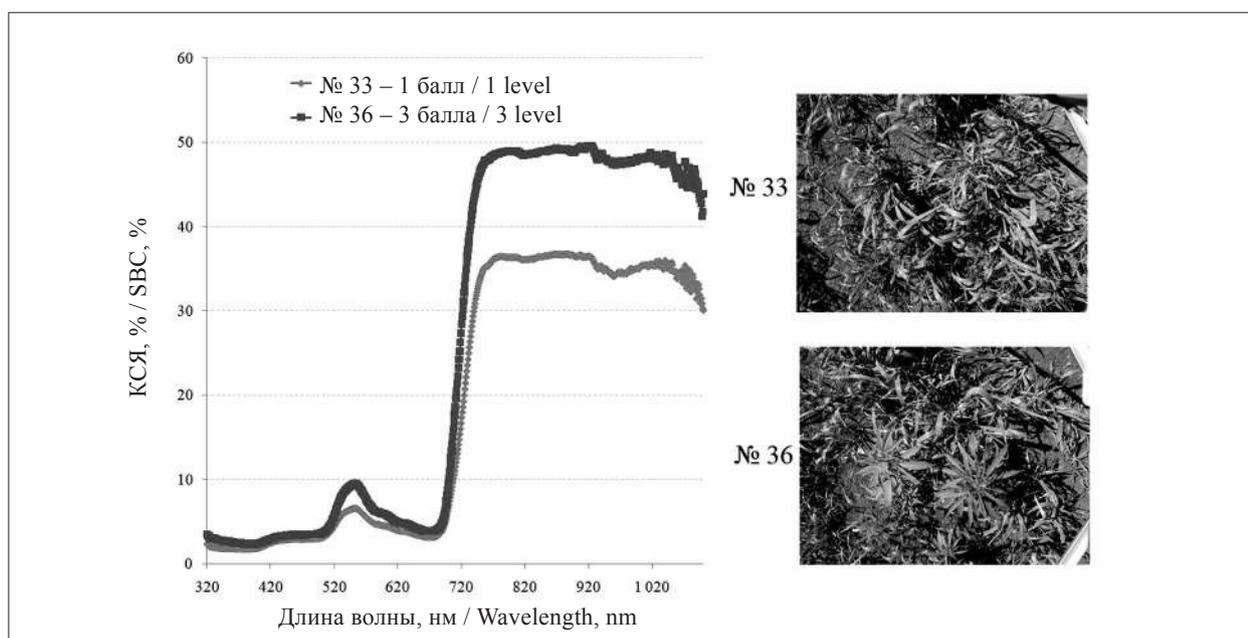


Рис. 2. Спектры отражения посевов пшеницы в зависимости от степени засорённости: № 33 – слабая степень (1 балл), № 36 – сильная степень (3 балла)

Fig. 2. The reflection spectra of wheat crops depending on the degree of weediness: No. 33 – a weak degree of weediness (1 level), No. 36 – a strong degree of weediness (3 level)

в которых одновременно (09.07.2019) проводили геоботанические и наземные спектрометрические исследования. Точки 1–10 и 41–45 расположены на незасеянных участках, точки 11–40 расположены на участках с посевами яровой пшеницы. Участки посевов пшеницы с разным количеством сорняков обозначены следующим образом: красными и синими кружками – с низкой степенью засорённости (1 и 2 балла), жёлтыми и зелёными кружками – с высокой степенью засорённости (3 и 4 балла). В результате исследованы участки с засорённостью 1 балл – в 9 точках, 2 балла – в 13 точках, 3 балла – в 10 точках и 4 балла – в 8 точках.

С помощью геоботанических исследований определены основные виды сорняков (табл.).

Применение результатов наземных подспутниковых исследований необходимо для повышения точности дешифрирования космических снимков [15, 16]. Один из результатов наземных спектрометрических исследований посевов пшеницы со слабой (1 балл) и сильной (3 балла) степенью засорённости коноплей сорной (*Cannabis ruderalis* Janisch.) представлен на рисунке 2. Измерения проведены 09.07.2019 в фазу бутонизации – цветения. Характерным признаком растительности и её состояния является спектральная отражательная способность, выражающаяся через коэффициент яркости. Отмечено различие в величине коэффициента спектральной яр-

кости культурной и сорной растительности в ближней инфракрасной области, которое, в основном, связано с различной структурой растений. Для посевов пшеницы с сильной степенью засорённости (3 балла) в ближней инфракрасной области КСЯ достигает 50%, тогда как со слабой степенью засорённости (1 балл) ниже 40%. Известно, что на значения индекса влияет видовой состав растительности, её сомкнутость, состояние и тип почвы под разреженной растительностью [17].

На рисунке 3 представлены усреднённые значения NDVI посевов пшеницы с различной степенью засорённости, рассчитанные по данным наземного спектрометрирования. Так как наземные спектры сделаны в нескольких повторностях (на посевах с засорённостью 1 балл – в 9 точках, 2 балла – в 13 точках, 3 балла – в 10 точках и 4 балла – в 8 точках) (рис. 1), то усреднение NDVI посевов пшеницы с разной степенью засорённости позволило повысить точность дешифрирования. В результате выявлено, что усреднённый NDVI посевов пшеницы с низкой степенью засорённости выше NDVI посевов пшеницы с высокой степенью засорённости. Величина NDVI посевов пшеницы без сорняков и с сорняками в 1 и 2 балла достигает значений (0,75–0,79), тогда как с засорённостью в 3 и 4 балла приближается к значениям (0,68–0,69).

На рисунках 4 и 5 (см. цв. вкладку IV) представлены карты пространственного рас-

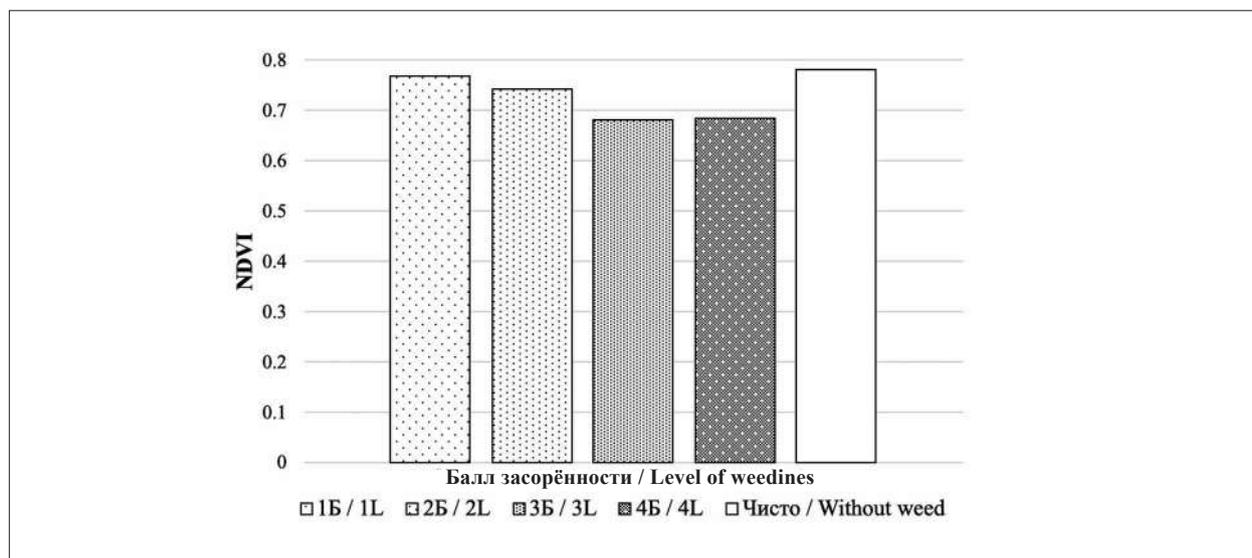


Рис. 3. Среднее значение NDVI посевов пшеницы с разной степенью засорённости по данным наземного спектрометрирования
Fig. 3. The average NDVI value of wheat crops with different degrees of weeding according to ground-based spectrometry

предела NDVI посевов пшеницы с разной степенью засорённости за 09.07.2019 г. и 02.08.2019 г. В течение вегетационного периода растения проходят определённые фенологические фазы развития. Происходящие при этом изменения отражаются на сезонной динамике их вегетационных индексов [18]. Величина NDVI является показателем фотосинтетически активной биомассы: чем темнее цвет, тем выше величина NDVI и тем больше количество сырой надземной фитомассы культурной и сорной растительности. Жёлтым и зелёным цветом помечены точки с сильной и очень сильной степенью засорённости, синим и красным – точки со слабой и средней степенью засорённости (рис. 4, см. вкладку IV). Высокая величина NDVI соответствует большому количеству сырой надземной биомассы культурных растений (пшеницы) при низкой степени засорённости. Низкая величина NDVI соответствует небольшому количеству сырой надземной биомассы культурных растений при высокой степени засорённости.

В августе начинается обильное цветение сорных растений. Соответственно уменьшается количество хлорофилла, в связи с этим уменьшается значение NDVI сорной растительности. Особенно это хорошо видно на карте распределения NDVI растительности засеянных и не засеянных полей за 02.08.2019 (рис. 5, см. вкладку IV).

Жёлтый прямоугольник обозначает незасеянное поле с сорными растениями. На этом

участке преобладают точки с сильной и очень сильной степенью засорённости, которые обозначены кружками жёлтого и зелёного цвета. С другой стороны, на засеянных полях 02.08.2019 пшеница находится в стадии конца цветения. На данный момент в ней содержится большое количество хлорофилла и, в связи с этим выявлено высокое значение NDVI посевов. Отсюда видна возможность дешифрирования полей с сорными растениями по спутниковым данным PlanetScope в течение периода вегетации.

Заключение

Для оценки засорённости сельскохозяйственных посевов проведено геоботаническое исследование, наземное спектрометрирование и дешифрирование серии космических снимков PlanetScope в течение 2019 года на территории Красноярского НИИСХ ФИЦ КНЦ СО РАН вблизи п. Минино (Средняя Сибирь, Красноярский край). По результатам рассчитаны значения NDVI посевов пшеницы с разной степенью засорённости.

В результате мониторинга посевов зерновых культур по наземным спектрометрическим и спутниковым данным PlanetScope выявлено влияние сорной растительности на величину NDVI сельскохозяйственных посевов.

Усреднённый NDVI, рассчитанный по наземным спектрам, посевов пшеницы с низкой степенью засорённости выше NDVI посевов

пшеницы с высокой степенью засорённости. Величина NDVI посевов пшеницы без сорняков и с засорённостью в 1 и 2 балла достигает значений (0,75–0,79), тогда как с засорённостью в 3 и 4 балла приближается к значениям (0,68–0,69).

На основании спутниковых данных построены карты пространственного распределения индекса NDVI в разное время периода вегетации (09.07.2019 и 02.08.2019). На них достоверно выявлены участки посевов пшеницы с разной степенью засорённости.

Показана возможность дешифрирования посевов зерновых культур с разным количеством сорняков по наземным спектрметрическим и спутниковым данным.

Литература

1. Баранов А.И., Гринько А.В. Влияние гербицидов на засорённость и урожайность ярового ячменя // Зерновое хозяйство России. 2014. № 6. С. 39–44.

2. Савин И.Ю., Докукин П.А., Вернук Ю.И., Жоголев А.В. О влиянии засорённости на NDVI посевов ярового ячменя, определяемый по спутниковым данным MODIS // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2017. Т. 14. № 3. С. 185–195.

3. Becker-Reshef I., Justice C., Sullivan M., Vermote E., Tucker C., Anyamba A., Small J. Monitoring global croplands with coarse resolution earth observations: the global agriculture monitoring (GLAM) project // Remote Sens. 2010. V. 2. No. 6. P. 1589–1609.

4. Wu B., Meng J., Li Q., Yan N., Du X., Zhang M. Remote sensing-based global crop monitoring: experiences with China's CropWatch system // International Journal of Digital Earth. 2014. V. 7. No. 2. P. 113–137.

5. Rembold F., Atzberger C., Savin I., Rojas O. Using low resolution satellite imagery for yield prediction and yield anomaly detection // Remote Sens. 2013. V. 5. No. 4. P. 1704–1733.

6. Архипова О.Е., Качалина Н.А., Тютюнов Ю.В., Ковалев О.В. Оценка засорённости антропогенных фитоценозов на основе дистанционного зондирования Земли (на примере амброзии полынолистной) // Исследования Земли из космоса. 2014. № 6. С. 15–26.

7. Михайленко И.М., Воронков И.В. Методы обнаружения сорняков, болезней и вредителей растений по данным дистанционного зондирования // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2016. Т. 13. № 3. С. 72–83.

8. Елсаков В.В., Кулюгина Е.Е. Растительный покров Югорского полуострова в условиях климатических изменений последних десятилетий // Исследования Земли из космоса. 2014. № 3. С. 65–77.

9. Анисимов О.А., Жильцова Е.Л., Разживин В.Ю. Моделирование биопродуктивности в арктической зоне

России с использованием спутниковых наблюдений // Исследования Земли из космоса. 2015. № 3. С. 60–70.

10. Терехин Э.А. Оценка сезонных значений вегетационного индекса (NDVI) для детектирования и анализа состояния посевов сельскохозяйственных культур // Исследования Земли из космоса. 2015. № 1. С. 23–31.

11. Шевырнов А.П., Письман Т.И., Кононова Н.А., Ботвич И.Ю., Ларько А.А., Высоцкая Г.С. Сезонная динамика растительности залежных земель Красноярской лесостепи по наземным и спутниковым данным // Исследования Земли из космоса. 2018. № 6. С. 39–51.

12. Pisman T.I., Shevyrnogov A.P., Larko A.A., Botvich I.Y., Emelyanov D.V., Shpedt A.A., Trubnikov Y.N. The information content of spectral vegetation indices in the interpretation of satellite images of cultivated fields // Biophysics. 2019. V. 64. No. 4. P. 588–592.

13. Planet Team. Planet Application Program Interface: In Space for Life on Earth; Planet Company: San Francisco, CA, USA, 2018 [Электронный ресурс] <https://api.planet.com> (Дата обращения: 10.01.2019).

14. Erunova M.G., Shpedt A.A., Trubnikov Y.N., Yakubailik O.E. Geospatial database for digitalization of agriculture of the Krasnoyarsk territory // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science Krasnoyarsk Science and Technology City Hall of the Russian Union of Scientific and Engineering Associations. 2019. V. 315. No. 3. Article No. 32022.

15. Pflugmacher D., Krankina O., Cohen W.B., Friedl M.A., SullaMenashe D., Kennedy R.E., Nelson P., Loboda T.V., Kuemmerle T., Dyukarev E., Elsakov V., Kharuk V.I. Comparison and assessment of coarse resolution land cover maps for Northern Eurasia // Rem. Sens. Env. 2011. V. 115. P. 3539–3553.

16. Hese S., Schmullius C. High spatial resolution image object classification for terrestrial oil spill contamination mapping in West Siberia // Int. J. Appl. Earth Obs. and Geoinf. 2009. V. 11. No. 2. P. 130–141.

17. Sims D.A., Gamon J.A. Relationships between leaf pigment content and spectral reflectance across a wide range of species, leaf structures and developmental stages // Remote Sens. Environ. 2002. V. 81. No. 2–3. P. 337–354.

18. 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.

References

1. Baranov A.I., Grinko A.V. The effect of herbicides on weediness and yield of spring barley // Zernovoye khozyaystvo Rossii. 2014. No. 6. P. 39–44 (in Russian).

2. Savin I.Yu., Dokukin P.A., Vernyuk Yu.I., Zhogolev A.V. On the effect of weediness on NDVI of spring barley crops, determined by MODIS satellite data // Sovremennyye problemy distantsionnogo zondirovaniya

- Zemli iz kosmosa. 2017. V. 14. No. 3. P. 185–195 (in Russian). doi: 10.21046/2070-7401-2017-14-3-185-195
3. Becker-Reshef I., Justice C., Sullivan M., Vermote E., Tucker C., Anyamba A., Small J. Monitoring global croplands with coarse resolution earth observations: the global agriculture monitoring (GLAM) project // *Remote Sens.* 2010. V. 2. No. 6. P. 1589–1609. doi: 10.3390/rs2061589
4. Wu B., Meng J., Li Q., Yan N., Du X., Zhang M. Remote sensing-based global crop monitoring: experiences with China's CropWatch system // *International Journal of Digital Earth.* 2014. V. 7. No. 2. P. 113–137. doi: 10.1080/17538947.2013.821185
5. Rembold F., Atzberger C., Savin I., Rojas O. Using low resolution satellite imagery for yield prediction and yield anomaly detection // *Remote Sens.* 2013. V. 5. No. 4. P. 1704–1733. doi: 10.3390/rs5115572
6. Arkhipova O.E., Kachalina N.A., Tyutyunov Yu.V., Kovalev O.V. Estimation of contamination of anthropogenic phytocenoses based on remote sensing of the earth (on the example of ragweed) // *Issledovaniye Zemli iz kosmosa.* 2014. No. 6. P. 15–26 (in Russian). doi: 10.7868/S0205961414050017
7. Mikhailenko I.M., Voronkov I.V. Methods for the detection of weeds, diseases and plant pests according to remote sensing // *Sovremennyye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa.* 2016. V. 13. No. 3. P. 72–83 (in Russian). doi: 10.21046/2070-7401-2016-13-3-72-83
8. Elsakov V.V., Kulugina E.E. Vegetation cover of the Ugra Peninsula under the conditions of climatic changes of recent decades // *Issledovaniye Zemli iz kosmosa.* 2014. No. 3. P. 65–77 (in Russian). doi: 10.7868/S0205961414030038
9. Anisimov O.A., Zhiltsova E.L., Razzhivin V.Yu. Modeling bio-productivity in the Arctic zone of Russia using satellite observations // *Issledovaniye Zemli iz kosmosa.* 2015. No. 3. P. 60–70 (in Russian). doi: 10.7868/S0205961415030021
10. Terekhin E.A. Assessment of seasonal values of the vegetation index (NDVI) for the detection and analysis of the state of crops of crops // *Issledovaniye Zemli iz kosmosa.* 2015. No. 1. P. 23–31 (in Russian). doi: 10.7868/S0205961415010108
11. Shevyrnogov A.P., Pisman T.I., Kononova N.A., Botvich I.Yu., Larko A.A., Vysotskaya G.S. Seasonal dynamics of vegetation of fallow lands of the Krasnoyarsk forest-steppe according to ground and satellite data // *Issledovaniye Zemli iz kosmosa.* 2018. No. 6. P. 39–51 (in Russian). doi: 10.31857/S020596140003367-4
12. Pisman T.I., Shevyrnogov A.P., Larko A.A., Botvich I.Y., Emelyanov D.V., Shpedt A.A., Trubnikov Y.N. The information content of spectral vegetation indices in the interpretation of satellite images of cultivated fields // *Biophysics.* 2019. V. 64. No. 4. P. 588–592. doi: 10.1134/S0006350919040158
13. Planet Team. Planet Application Program Interface: In Space for Life on Earth; Planet Company: San Francisco, CA, USA, 2018 [Internet resource] <https://api.planet.com> (Accessed: 10.01.2019).
14. Erunova M.G., Shpedt A.A., Trubnikov Y.N., Yakubailik O.E. Geospatial database for digitalization of agriculture of the Krasnoyarsk territory // *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science Krasnoyarsk Science and Technology City Hall of the Russian Union of Scientific and Engineering Associations.* 2019. V. 315. No. 3. Article No. 32022. doi: 10.1088/1755-1315/315/3/032022
15. Pflugmacher D., Krankina O., Cohen W.B., Friedl M.A., SullaMenashe D., Kennedy R.E., Nelson P., Loboda T.V., Kuemmerle T., Dyukarev E., Elsakov V., Kharuk V.I. Comparison and assessment of coarse resolution land cover maps for Northern Eurasia // *Rem. Sens. Env.* 2011. V. 115. P. 3539–3553. doi: 10.1016/j.rse.2011.08.016
16. Hese S., Schmullius C. High spatial resolution image object classification for terrestrial oil spill contamination mapping in West Siberia // *Int. J. Appl. Earth Obs. and Geoinf.* 2009. V. 11. No. 2. P. 130–141. doi: 10.1016/j.jag.2008.12.002
17. Sims D.A., Gamon J.A. Relationships between leaf pigment content and spectral reflectance across a wide range of species, leaf structures and developmental stages // *Remote Sensing of Environment.* 2002. V. 81. No. 2–3. P. 337–354. doi: 10.1016/S0034-4257(02)00010-X
18. Tovstik E.V., Adamovich T.A., Ashikhmina T.Ya. Identification of areas of mass growth of the hogweed *Sonchus oleraceus* using spectral indices according to Sentinel-2 // *Theoretical and Applied Ecology.* 2019. No. 3. P. 34–40 (in Russian). doi: 10.25750/1995-4301-2019-3-034-040

Size-age and histomorphological indicators of the Arctic grayling (*Thymallus arcticus*) of Putorana Nature Reserve

© 2023. I. S. Nekrasov ORCID: 0000-0001-5780-8156*

A. G. Selyukov ORCID: 0000-0001-9072-9089*

Tyumen State University,

6, Volodarskogo St., Tyumen, Russia, 625003,

e-mail: nekrasov.i.s@mail.ru

In waterbodies of high latitudes, ichthyofauna of the boreal foothill complex is highly sensitive to unfavorable factors. Poorly studied and extremely vulnerable freshwater ecosystems of the Subarctic require an especially close attention, considering conditions of global climate changes and increasing anthropogenic impact. An important method of their protection is creation of Specially Protected Natural Areas (SPNA) with purpose of preserving natural ecosystems in their intact state. However, territories that are not subjects of anthropogenic influence are extremely rare presently. While studying the Arctic grayling (*Thymallus arcticus*) of the Irkinda River (the Putorana Plateau), flowing through the territory of Putorana Reserve, some histopathologies pointing on an unstable ecological situation in this region were revealed. The noted initial stages of pathological process in branchial apparatus, namely – hyperplasia, aneurysms, fusion of respiratory lamellae, and an increase of cells layers in intercalary epithelium – indicate suppression of respiratory function. The reproductive system is less affected, but abnormalities are also found in it. Resorption of vitellogenic oocytes was revealed in 83% of individuals. Moreover, all the males of the Arctic grayling took part in the past spawning, while the number of spawned females was not more than 67%.

Keywords: histological analysis, Arctic grayling, gonads, gills, Irkinda River, Putorana Plateau.

УДК 597.5:591.8:574.24

Размерно-возрастные и гистоморфологические показатели сибирского хариуса (*Thymallus arcticus*) Пutorанского заповедника

© 2023. И. С. Некрасов, к. б. н., доцент,

А. Г. Селюков, д. б. н., профессор,

Тюменский государственный университет,

625003, Россия, г. Тюмень, ул. Володарского, д. 6,

e-mail: nekrasov.i.s@mail.ru

В водоёмах высоких широт ихтиофауна бореального предгорного комплекса весьма чувствительна к неблагоприятным факторам. В условиях глобального изменения климата и возрастающего антропогенного воздействия малоизученные и крайне уязвимые пресноводные экосистемы Субарктики нуждаются в пристальном внимании. Важным видом охраны является создание особо охраняемых природных территорий с целью сохранения природных экосистем в нетронутом состоянии. Однако в настоящее время территории, не подверженные антропогенному влиянию, встречаются крайне редко. При исследовании сибирского хариуса (*Thymallus arcticus*) р. Ирkinda (плато Пutorана), протекающей по территории Пutorанского заповедника, выявлены гистопатологии, указывающие на нестабильную экологическую ситуацию данного региона. Отмеченные начальные стадии патологического процесса в жаберном аппарате – гиперплазия, аневризмы, слияние респираторных ламелл и увеличение слоёв клеток вставочного эпителия – свидетельствуют об угнетении респираторной функции. Репродуктивная система менее поражена, но и в ней обнаружены отклонения. В яичниках у 83% особей отмечена резорбция вителлогенных ооцитов и, если в прошедшем нересте принимали участие все самцы сибирского хариуса, то доля отнерестившихся самок не превышала 67%.

Ключевые слова: гистологический анализ, сибирский хариус, гонады, жабры, река Ирkinda, плато Пutorана.

Environment stability determines normal functioning of vulnerable northern ecosystems. However, climate changes together with intensifying multi-factor anthropogenic pressure of recent decades are leading to degradation of the ecosystems, as well as decrease of biological diversity and number of species [1]. In this regard, along with inventory of the key nature communities in Arctic latitudes, it is necessary to determine their current morphological and functional status. In order to establish a full picture of the ongoing changes, their initial state should be identified – the “zero point” of the reference. Specially Protected Natural Areas (SPNA) are becoming the standard of certain natural zones, a reserve for subsequent dispersal of species in impact areas.

Due to native accumulation entity of natural reservoirs, aquatic organisms are the most important indicators of environment state. Fish represent the highest trophic level of freshwater ecosystems. In terms of the volume of fresh water, lakes of the Putorana Plateau rank second after Lake Baikal. They are characterized by a complexly formed hydro system and a unique variety of salmonid fish [2]. In northern waterbodies, salmonids are represented by arctic freshwater (salmon, whitefish) and boreal foothill (grayling) faunistic complexes are the most sensitive to ecological regime changes. As a result of a long life cycle, certain age-related changes occur in structure of their internal organs and tissues. In conditions of environmental pollution, various types of pathologies are being accumulated. For the accurate description of long-term dynamics of ichthyocenosis, a detailed histomorphological analysis makes it possible to assess the ontogenetic history of studied individuals [3–7], and identify the incipient degenerative changes in organs and tissues.

As we know, graylings are freshwater fish that inhabit small fast rivers and cold lakes of Europe, Asia, and North America. The Arctic grayling *Thymallus arcticus* is a highly polymorphic species. It forms a large number of subspecies and other forms of a lower systematic level in the basin of the Arctic Ocean, from Kara to Chukotka and North America [8–11]. However, there are no histological studies of internal organs and their possible pathomorphological changes in this species carried out in high-latitude waterbodies of Eastern Siberia.

The purpose of the present study was to characterize the size-age composition and describe histomorphological state of vital organs of the Arctic grayling in a mountain river of

the Putorana plateau in conditions of minimal anthropogenic load.

Material and Methods of the Research

The Irkinda mountain river flows through the territory of Putorana State Nature Reserve located in the northwestern part of the Putorana Plateau. The length of the watercourse is 66 km, the catchment area is 990 km². The water temperature varied from 8.5 to 11.9 °C during the study period. Collection of the material was implemented upstream of one of the most beautiful waterfalls of the plateau – the 27-meter Kitabo-Oron (Big Irkindinsky waterfall).

The Arctic graylings were caught in August 2016. 33 individuals of different ages of both sexes were examined and 80 histological preparations were made to assess the size-age composition, gonads histomorphology, and branchial apparatus.

Age was detected by studying the fish scales. In implementation of the work, we were guided by standard ichthyological methods [12] and histological methods [13]. Clinical and pathological examination of the fish was carried out [14, 15]. The prepared parts of the organs were fixed in Brodsky's mixture. Histological sections of gills, ovaries, and testes were stained with Heidenhain's iron hematoxylin and Heidenhain's azan method, after that they were placed under a cover slip in BioMount medium.

Histological and cytological measurements were made using an AxioCam MRc5 video camera on an AxioImager A1 microscope at magnification 40 to 1000. Using licensed software AxioVision Release 4.7.1, resorbing oocytes and empty follicles were noted on ovarian cuts, diameter of oocytes and their nuclei was measured. Three cuts of the preparations of the testes were randomly selected from each individual. In each of them 5 fields with an area of 200 μm² were selected. The number of cells of different generations was counted in these fields.

In branchial apparatus of each fish, 5 fields of filaments were selected on one cut. The following measurements were taken on them: the width of respiratory lamellae (proximal, medial, and distal sides) in μm, the number of mucous cells in 1 mm², the number of layers of intercalated epithelium cells. Proportion of branchial pathologies of various types was measured on the histological cut. Then, index of organ pathology was calculated according to the formula, the essence of which is summing of

I. S. Nekrasov, A. G. Selyukov
 "Size-age and histomorphological indicators of the Arctic grayling
 (*Thymallus arcticus*) of Putorana Nature Reserve". P. 117.

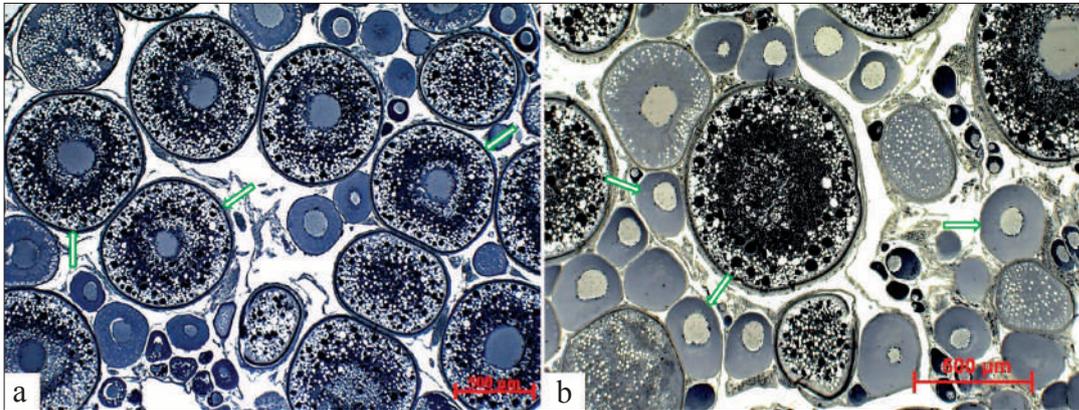


Fig. 1. Ovary of the Arctic grayling, stage III of maturity, the Irkinda river
 a – the older generation is represented by vitellogenic oocytes in the yolk accumulation phase (the arrows); b – numerous previtellogenic oocytes (the arrows). Dye: Heidenhain iron hematoxylin

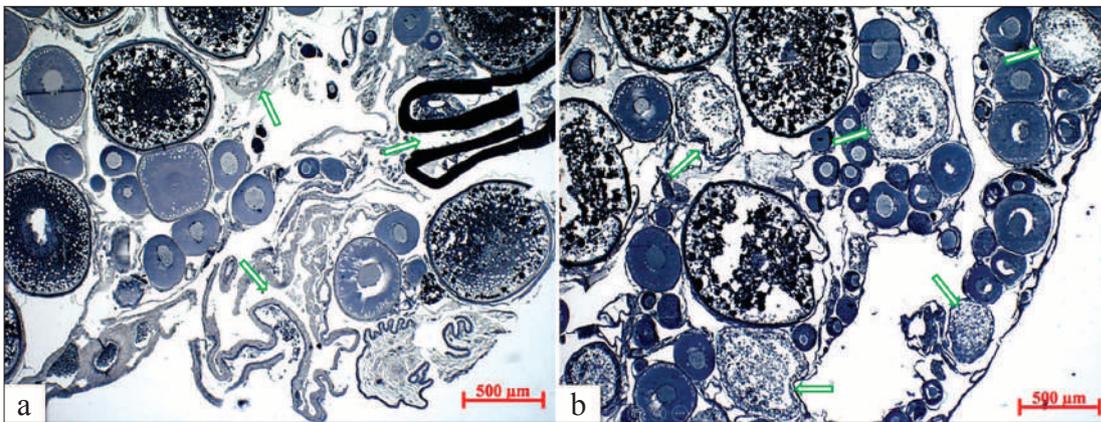


Fig. 2. Vitellogenic oocytes of the Arctic grayling of the Putorana plateau
 a – traces of the past spawning in the form of empty follicles (the arrows);
 b – multiple atresia of vitellogenic oocytes (the arrows). Dye: Heidenhain iron hematoxylin

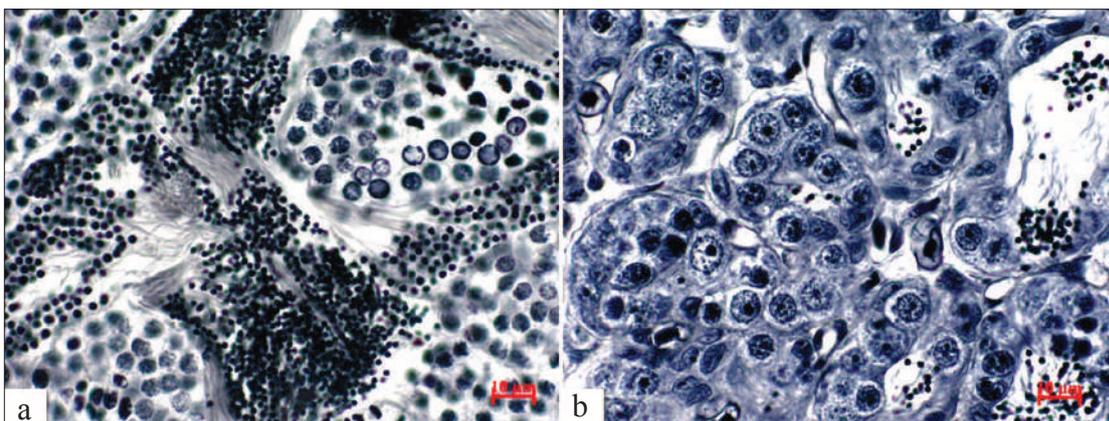


Fig. 3. Typical testes state of the Arctic grayling of the Putorana plateau
 a – a testis section of a sexually mature male; there are order I spermatocyte cysts among numerous spermatozoa and spermatids; b – the bulk of germ cells is represented by A- and B-type spermatogonia in an immature male; there are some single spermatids in the lumen of the seminiferous tubules.
 Dye: Heidenhain iron hematoxylin

I. S. Nekrasov, A. G. Selyukov
 "Size-age and histomorphological indicators of the Arctic grayling
 (*Thymallus arcticus*) of Putorana Nature Reserve". P. 117.

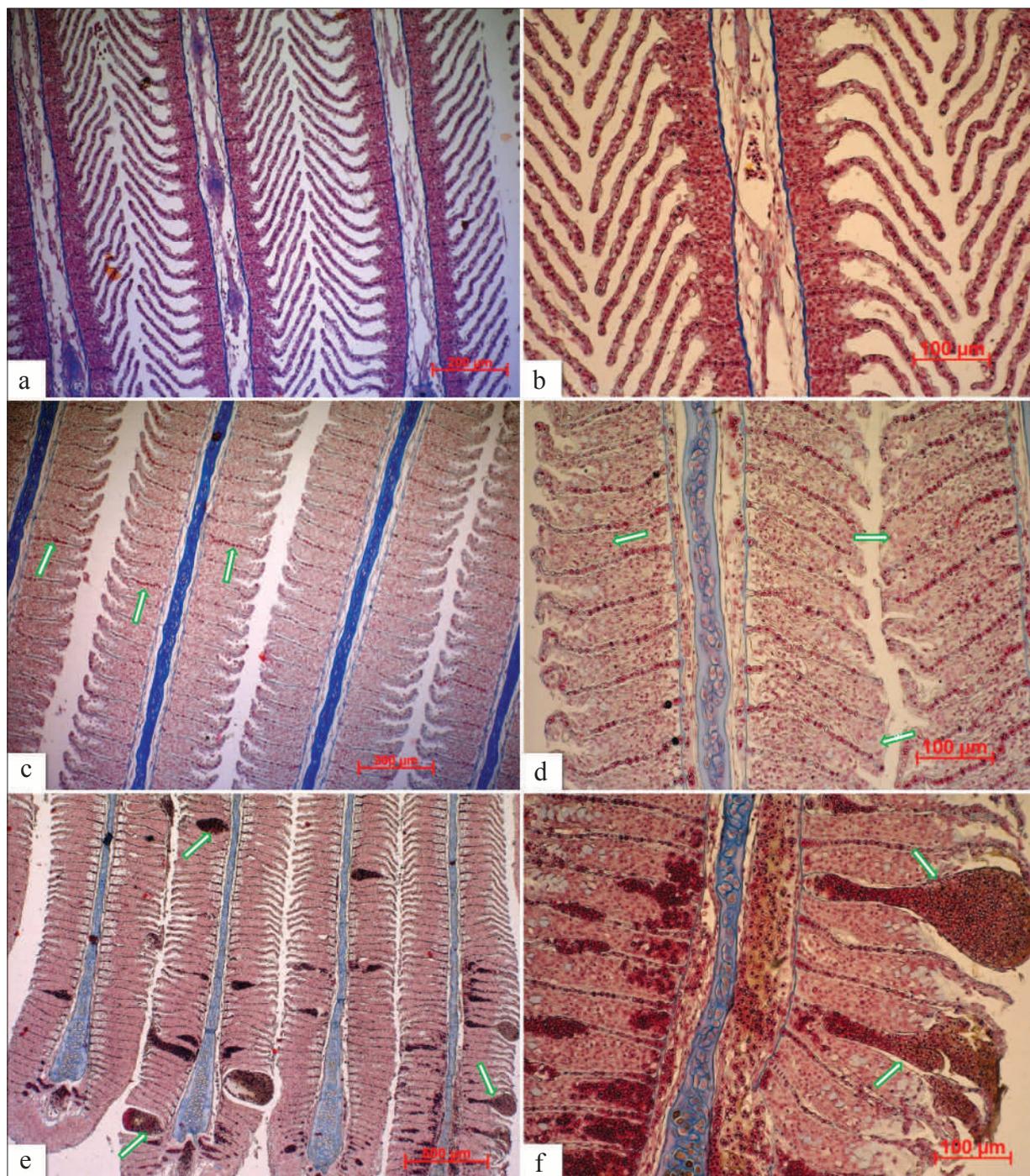


Fig. 5. Gill apparatus of the Arctic grayling of the Irkinda river of the Putorana plateau: a – normal state of the branchial apparatus; b – normal state at higher magnification; c – hyperplasia, hemolysis of erythrocytes (the arrows); d – also at a higher magnification, fusion and increase in intercalary epithelium (the arrows); e – numerous aneurysms (the arrows); f – hemostasis of respiratory lamellae (the arrows). Dye: adhan according to Heidenhain

the shares of each pathology, multiplied by the significance coefficient [16]:

$$I_{pat} = \sum_{patl} \frac{S_{patl}}{S_{org}} \cdot C_{sign},$$

where I_{pat} – index of gill pathology; S_{patl} – area of the pathology; S_{org} – area of the studied zone; C_{sign} – significance coefficient $1 \leq C_{sign} \leq 3$.

Results and Discussion

Fish of older age groups predominated in the catches (Table 1), among which males predominated (sex ratio 1.8 : 1). The oldest age group was fish of eight years age. Their gonadosomatic index (GSI) was increasing with age. This indicator reflected a relatively large ovarian mass. Most of the fish were sexually mature and had been preparing for the next spawning season. According to results of the histological analysis, Arctic graylings of both sexes in the Irkinda river sexually mature at the age of 6. The largest proportion of females ready for spawning was noted at the age of seven (6+).

Gonads. The ovaries in the majority of sexually mature individuals of the Arctic grayling of the Irkinda river were at maturity stage III, in which vitellogenic oocytes in the yolk accumulation phase were the oldest generation of germ cells

(Fig. 1a, see color insert V). The next generation of germ cells is represented by vitellogenic oocytes in cytoplasm vacuolization phase. The next generation was numerous previtellogenic oocytes of different size groups (Fig. 1b, see color insert V).

According to the histological analysis results, ovaries of the majority (67%) of females had traces of the past spawning in the form of degenerating empty follicles among vitellogenic oocytes (Fig. 2a, see color insert V). However, in 83% of females, most of vitellogenic oocytes in cytoplasm vacuolization phase were in the process of resorption (Fig. 2b, see color insert V).

Analysis of the germ cells at different stages of oogenesis showed (Table 2) that in females of different ages, the sizes of oocytes at similar phases veraciously did not differ ($p > 0.05$) or varied insignificantly.

Testes of the most of males were at maturity stage III. Spermatids and sperm were accumulated in seminiferous tubules. Spermatids, sperm, and spermatocytes of the order I were present in the greatest amount in almost all the individuals (Fig. 3a, see color insert V). In immature fish in 3+– 4+, the bulk of germ cells was represented by spermatogonia and spermatocytes (Fig. 3b, see color insert V).

All the types of cells were present in testes of most of the males, but the amount of sperm

Table 1

Biological parameters of the Arctic grayling of the Irkinda river of the Putorana plateau

Parameters	Sex	Age, years			
		3+ – 4+	5+	6+	7+
Smith length, mm	♀	–	<u>318.7±1.3</u> 316–320 (n = 3)	<u>341.8±3.0</u> 333–350 (n = 6)	<u>350±8</u> 334–359 (n = 3)
	♂	<u>285.6±3.4</u> 276–295 (n = 5)	<u>325±4</u> 315–332 (n = 4)	<u>364±5</u> 348–379 (n = 7)	<u>370±4</u> 362–386 (n = 5)
Body mass, g	♀	–	<u>349±12</u> 333–373 (n = 3)	<u>421±7</u> 393–438 (n = 6)	<u>454±21</u> 418–492 (n = 3)
	♂	<u>232±7</u> 208–249 (n = 5)	<u>369±20</u> 314–409 (n = 4)	<u>497±18</u> 424–548 (n = 7)	<u>538±12</u> 514–579 (n = 5)
GSI, %	♀	–	<u>0.84±0.15</u> 0.61–1.13 (n = 3)	<u>1.99±0.12</u> 1.51–2.31 (n = 6)	<u>2.51±0.20</u> 2.16–2.84 (n = 3)
	♂	<u>0.17±0.01</u> 0.14–0.19 (n = 5)	<u>0.79±0.26</u> 0.32–1.31 (n = 4)	<u>1.44±0.09</u> 1.10–1.89 (n = 7)	<u>1.35±0.07</u> 1.18–1.60 (n = 5)

Note. In this table and in the tables 2, 3 the following legend is used: above the line – the average value and its error, below the line – min–max, n – the number of studied fish, “–” – lack of data.

Table 2

Generative indicators of different age groups of the Arctic grayling

Parameters		Oocyte diameter, μm	Nuclei diameter, μm		
Age, years	5+ (n = 3)	Previtellogenic oocytes	295 ± 8 283–311	128.3 ± 0.9 126–129	
		Vitellogenic oocytes of the cytoplasm vacuolization phase	520 ± 40 459–599	187 ± 16 167–218	
	6+ (n = 6)	Previtellogenic oocytes	298 ± 4 287–315	130.1 ± 2.5 122–137	
		Vitellogenic oocytes	cytoplasm vacuolization phase	487 ± 8 468–513	191 ± 6 168–202
			yolk accumulation phase	926 ± 20 861–986	235 ± 6 211–251
	7+ (n = 3)	Previtellogenic oocytes	299 ± 5 288–305	123.8 ± 2.2 119–126	
		Vitellogenic oocytes	cytoplasm vacuolization phase	522 ± 21 493–563	173.7 ± 3.2 168–179
			yolk accumulation phase	945 ± 36 874–987	235.6 ± 3.8 229–242

was increasing with age due to entry of young generations into meiosis (Fig. 4).

Branchial apparatus. Comparing to the other organs, gills (Fig. 5 a, b, see color insert VI) are highly reactive. This is why even a slight change in hydrochemical regime of the waterbody can cause an adaptive-compensatory restructuring in a very short period of time, which leads to violation of the structure and functioning of the whole organ. Most of the

studied fish were diagnosed with pathologies of various nature and depth. The most common ones are cytolysis and thickening of respiratory lamellae (Fig. 5 c, d, see color insert VI). Number of pathologies and their proportion increase with age. In seven years age fish, pathologies such as aneurysms and fusion of the respiratory lamellae appear clearly in addition to the aforementioned deviations (Fig. 5 e, f, see color insert VI).

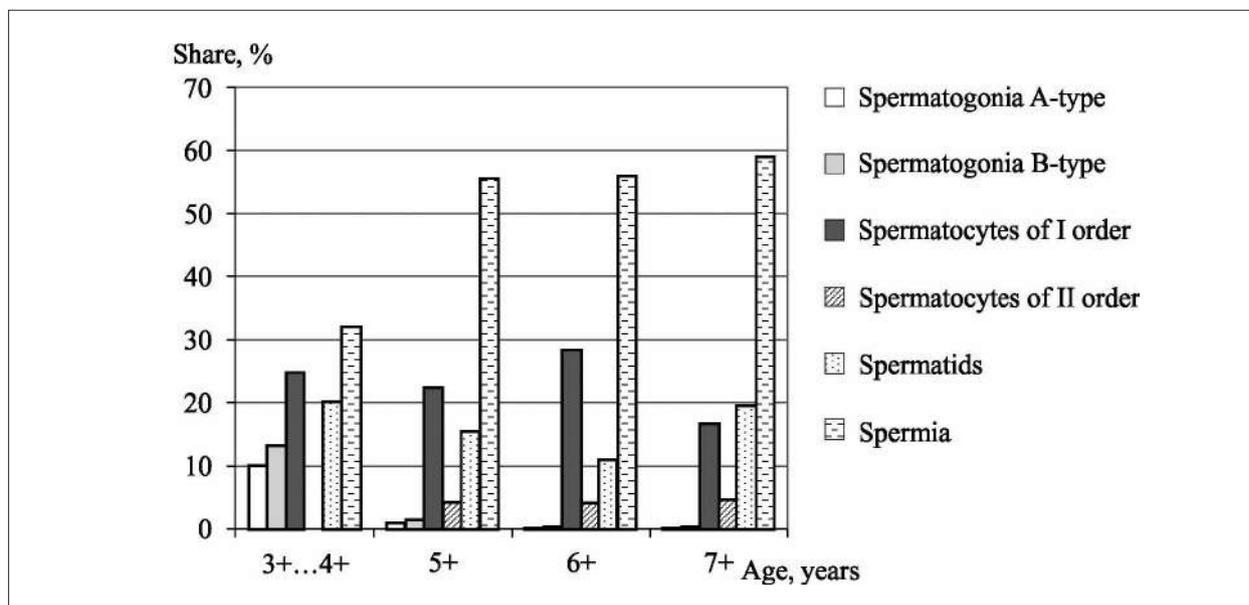


Fig. 4. Ratio (%) of reproductive cells in testes of the Arctic grayling of different age groups (the Irkinda river)

Table 3

The main cytometric characteristics of the branchial epithelium of the Arctic grayling of the Irkinda river of the Putorana plateau (August, 2016)

Age, years (n, copies)	Parameters			
	number of layers intercalary epithelium cells	respiratory lamella width, μm	number of mucous cells per 1 mm ²	index of pathology, %
4+ (n = 4)	<u>8.3±0.8</u> 6.9–9.7	<u>15.7±0.2</u> 15.4–16.1	<u>266±102</u> 157.1–468.9	<u>0.07±0.01</u> 0.06–0.10
5+ (n = 6)	<u>7.9±0.6</u> 6.9–10.1	<u>16.0±1.1</u> 14.0–21.5	<u>252±23</u> 176.4–322.1	<u>0.10±0.02</u> 0.06–0.16
6+ (n = 7)	<u>10.8±2.1</u> 7.8–15.0	<u>16.8±1.9</u> 14.7–20.8	<u>233±20</u> 212.6–271.9	<u>0.05±0.02</u> 0.03–0.10
7+ (n = 5)	<u>9.4±0.6</u> 8.0–10.9	<u>18.0±0.9</u> 15.8–20.2	<u>240±16</u> 207.4–272.1	<u>0.19±0.05</u> 0.07–0.31

Frequency of occurrence and variety of disorders of the branchial epithelium increased with age, which is reflected in the index of pathology (Table 3). This trend is also true for such cytometric indicators as thickness of respiratory lamellae and number of layers intercalary epithelium cells.

6–7-year-old individuals of both sexes were dominated in the catches. According to the study, the size-mass indicators of the Arctic grayling of the Irkinda River are comparable with the literature data for other waterbodies of Siberia [17–20], which indicates a sufficient food base of the waterbody, despite the extreme living conditions.

According to results of the histological analysis, the Arctic grayling of the Irkinda River sexually matures at the age of 5+, but seven years age individuals made up the majority of sexually mature fish. The oldest generation of germ cells in the ovaries were vitellogenic oocytes in yolk accumulation phase. The reproductive potential is represented by numerous previtellogenic oocytes of different size groups, which indicates a high reproductive potential of the fish [4, 5, 21]. Though, resorption of vitellogenic oocytes in the phase of cytoplasm vacuolization was noticed in the majority of females (83%). With an insignificant proportion of resorbed oocytes in cytoplasm vacuolization phase, such processes can be considered as a norm [22, 23]. This is the phenomenon that was noted in 67% of females of the Arctic grayling of the Irkinda river, which had spawned this year and had been preparing for spawning next year.

We assume that the noted phenomenon reflects an insufficient level of hormones responsible for full-fledged vitellogenesis of all the sex cells entered the hormone-dependent period. The older generations of oocytes intercept estrogens, hereby preventing their entry into the

oocyte follicles in the cytoplasm vacuolization phase. Nevertheless, state of the ovaries allows to consider that these females were able to take part in the upcoming spawning.

Testes of the most sexually mature individuals were at maturity stage III. Based on results of the histological analysis, we can confidently state that all the males took part in the past spawning. Reproductive dysfunctions were not found in males. According to the obtained data, individuals of the Arctic grayling had a high level of reproductive activity in the post-spawning period, in spite of low average annual temperatures in the subarctic region.

The branchial apparatus, along with gas exchange and water-salt metabolism, performs a barrier function in the fish organism and has the highest reactivity comparing with other organs, for it responds the most quickly to changes of the hydrochemical regime [24, 25]. Analysis of the gill apparatus state is often used to assess the morphofunctional status of fish [6, 7, 26–29] as the highest trophic link of freshwater ecosystems. Based on the obtained data, it can be claimed that the identified deviations of the branchial apparatus state in the Arctic grayling of the Irkinda river are caused by influence of some kind of unfavorable factor(s). At the same time, no sex specificity in the manifestation of these pathologies was found.

Conclusion

In general, according to the results of the study of the Arctic grayling of the Irkinda River, some deviations in the gonads of females were noticed. At the same time, significant anomalies were revealed in individuals of both sexes in the functioning of their respiratory system. Consequently, aerotechnogenic pollution and

pollutant deposits from industrial enterprises of Norilsk city occur even in a mountainous, hard-to-reach protected area [30]. In addition, Ershov [31] described an increased content of lead in soils of Kutaramakan Lake area, where this river eventually flows into. This phenomenon is caused not by technogenic reasons, but by the parent (ore-producing) metallogenic rock. Thus, the revealed pathological changes are the result of both natural and anthropogenic influences.

This research was funded by the Tyumen Oblast Government, as part of the West-Siberian Interregional Science and Education Center's project No. 89-DON (2). The authors are grateful to V.I. Romanov and O.A. Begletsov for the opportunity to conduct the field work.

Литература

1. Бознак Э.И., Захаров А.Б. Изменение ростовых процессов европейского хариуса тиманского водотока в условиях неконтролируемой эксплуатации // Теоретическая и прикладная экология. 2021. № 2. С. 222–228.
2. Романов В.И. Ихтиофауна плато Путорана // Фауна позвоночных животных плато Путорана. М.: Наука, 2004. С. 29–89.
3. Савваитова К.А., Чеботарева Ю.В., Пичугин М.Ю., Максимов С.В. Аномалии в строении рыб как показатели состояния природной среды // Вопросы ихтиологии. 1995. Т. 35. Вып. 2. С. 182–188.
4. Селюков А.Г. Репродуктивная система сиговых рыб (Coregonidae, Salmoniformes) как индикатор состояния экосистемы Оби. I. Половые циклы пеляди *Coregonus peled* // Вопросы ихтиологии. 2002. Т. 42. № 1. С. 85–92.
5. Селюков А.Г. Репродуктивная система сиговых рыб (Coregonidae, Salmoniformes) как индикатор состояния экосистемы Оби. II. Половые циклы муксуна *Coregonus muksun* // Вопросы ихтиологии. 2002. Т. 42. № 2. С. 225–235.
6. Moiseenko T.I., Sharova O.N. Physiological mechanisms of degradation of fish populations in acidified water bodies // Russian Journal of Ecology. 2006. V. 37. No. 4. P. 257–263.
7. Лукин А.А., Лукина Ю.Н. Арктический голец как индикатор качества вод горных озёр Хибинского массива в условиях хронического загрязнения // Труды ВНИРО. Промысловые виды и их биология. 2019. Т. 178. С. 104–111.
8. Никольский Г.В. Частная ихтиология. М.: Высшая школа, 1971. 367 с.
9. Решетников Ю.С. Атлас пресноводных рыб России в двух томах. Т. 1. М.: Наука, 2002. 381 с.
10. Weiss S., Knizhin I., Romanov V., Kopun T. Secondary contact between two divergent lineages of grayling *Thymallus* in the lower Enisey basin and its taxonomic implications // Journal of Fish Biology. 2007. V. 71. P. 371–386.
11. Romanov V.I. On the taxonomic composition of the graylings (*Thymallidae*) from the Ob and Yenisei river basins // International Journal of Environmental Studies. 2017. V. 74. No. 5. P. 845–853.
12. Правдин И.Ф. Руководство по изучению рыб. М.: Изд-во «Пищевая промышленность», 1966. 221 с.
13. Микодина Е.В., Седова М.А., Чмилевский Д.А., Микулин А.Е., Пьянова С.В., Полуэктова О.Г. Гистология для ихтиологов: Опыт и советы. М.: ВНИРО, 2009. 112 с.
14. Комплексное гидрохимическое и биологическое исследование качества вод и состояния водных и околоводных экосистем: методическое руководство. Часть 1. Полевые исследования / Под ред. Т.И. Моисеенко. Тюмень: ТюмГУ, 2011. 128 с.
15. Комплексное гидрохимическое и биологическое исследование качества вод и состояния водных и околоводных экосистем: методическое руководство. Часть 2. Камеральные работы / Под ред. Т.И. Моисеенко. Тюмень: ТюмГУ, 2012. 304 с.
16. Bernet D., Schmidt H., Meier W., Burkhardt-Holm P., Wahli T. Histopathology in fish: proposal for a protocol to assess aquatic pollution // Journal Fish Diseases. 1999. No. 22. P. 25–34.
17. Зиновьев Е.А., Богданов В.Д. Морфобиологические особенности сибирского хариуса (*Thymallus arcticus*, *Thymallidae*) полярного Урала // Ветеринария Кубани. 2012. № 4. С. 22–24.
18. Зиновьев Е.А., Богданов В.Д. Сравнительный морфобиологический анализ сибирского хариуса (*Thymallus arcticus*, *Thymallidae*) северной и полярной части Урала // Вестник Астраханского государственного технического университета. Серия: рыбное хозяйство. 2012. № 2. С. 33–40.
19. Романов В.И. Морфологическая изменчивость сибирского хариуса (*Thymallus arcticus* (Pallas, 1776)) из разнотипных озёр бассейна реки Хатаги (полуостров Таймыр) в связи с адаптациями к горным и равнинным условиям // Известия Иркутского государственного университета. Серия: Биология. Экология. 2016. Т. 18. С. 45–57.
20. Романов В.И., Лаврентьев С.Ю., Дылдин Ю.В. К морфологии сибирского хариуса (*Thymallus arcticus* (Pallas)) из бассейна реки Казым (нижняя Обь) // Вестник Сургутского государственного университета. 2016. № 3. С. 37–42.
21. Селюков А.Г., Шуман Л.А., Некрасов И.С. Состояние гонад у лососевидных рыб в субарктических озёрах Ямала и Гыдана // Вестник Тюменского университета. Медико-биологические науки. 2012. № 6. С. 31–40.
22. Фалеева Т.И. Особенности процесса атрезии овариального фолликула у ерша при разных температурах // Экологическая пластичность половых циклов и размножения рыб. Л.: ЛГУ, 1975. С. 123–139.

23. Фалеева Т.И. Результаты экспериментального анализа нарушений оогенеза у рыб // Проблемы надежности функционирования репродуктивной системы у рыб. Тр. Биол. НИИ. СПб.: СПбГУ, 1997. Вып. 44. С. 84–90.

24. Виноградов Г.А. Процессы ионной регуляции у пресноводных рыб и беспозвоночных. М.: Наука, 2000. 216 с.

25. Матей В.Е. Жабры пресноводных костистых рыб: морфофункциональная организация, адаптация, эволюция. СПб.: Наука, 1996. 204 с.

26. Амплеева А.В., Ложниченко О.В. Патологические изменения почек и жабр белорыбицы Волго-Каспийского бассейна // Вестник АГТУ. 2010. № 2. С. 116–118.

27. Сафиханова Х.М., Оруджева А.М., Рустамов Э.К. Гистопатологические изменения жаберной ткани у сазана в результате воздействия сырой нефти высоких концентраций // Вестник МГОУ. Серия «Естественные науки». 2012. № 4. С. 62–67.

28. Лукин А.А., Лукина Ю.Н. Проблемы здоровья рыб во внутренних водоёмах России // Труды ВНИРО. 2015. Т. 157. С. 32–44.

29. Лукина Ю.Н., Пономарев В.И., Лукин А.А. Структурно-функциональные изменения рыб в фоновых озёрах Приполярного Урала // Международный вестник ветеринарии. 2018. № 3. С. 129–139.

30. Zubareva O.N., Skripal'shchikova L.N., Greshilova N.V., Kharuk V.I. Zoning of landscapes exposed to technogenic emissions from the Norilsk mining and smelting works // Russian Journal of Ecology. 2003. V. 34. No. 6. P. 375–380.

31. Ершов Ю.И. Эколого-геохимическая оценка мерзлотных почв Среднесибирского плоскогорья // Сибирский экологический журнал. 2014. № 6. С. 975–986.

References

1. Boznak E.I., Zakharov A.B. The changes in growth processes of the european grayling from the timan stream in conditions of non-controlled exploitation // Theoretical and Applied Ecology. 2021. No. 2. P. 222–228 (in Russian). doi: 10.25750/1995-4304-2021-2-222-228

2. Romanov V.I. Ichthyofauna of the Putorana Plateau // Vertebrate Fauna of the Putorana Plateau. Moskva: Nauka, 2004. P. 29–89 (in Russian).

3. Savvaitova K.A., Chebotareva Yu.V., Pichugin M.Yu., Maksimov S.V. Anomalies of fish structure as indicators of natural environment state // Issues of Ichthyology. 1995. V. 35. No. 2. P. 182–188 (in Russian).

4. Selyukov A.G. Reproductive system of whitefishes (Coregonidae, Salmoniformes) as an indicator of the Ob river ecosystem state. I. Sexual cycles of the peled *Coregonus peled* // Issues of Ichthyology. 2002. V. 42. No. 1. P. 85–92 (in Russian).

5. Selyukov A.G. Reproductive system of whitefishes (Coregonidae, Salmoniformes) as an indicator of the Ob

river ecosystem state. II. Sexual cycles of the muksun *Coregonus muksun* // Issues of Ichthyology. 2002. V. 42. No. 2. P. 225–235 (in Russian).

6. Moiseenko T.I., Sharova O.N. Physiological mechanisms of degradation of fish populations in acidified water bodies // Russian Journal of Ecology. 2006. V. 37. No. 4. P. 257–263. doi: 10.1134/S1067413606040072

7. Lukin A.A., Lukina Yu.N. The Arctic char as an indicator of water quality of mountain lakes of the Khibiny massif in conditions of chronical pollution // Researches of VNIRO. Commercial species and their biology. 2019. V. 178. P. 104–111 (in Russian). doi: 10.36038/2307-3497-2019-178-104-111

8. Nikolsky G.V. Private ichthyology. Moskva: Vysshaya shkola, 1971. 367 p. (in Russian).

9. Reshetnikov Yu.S. Atlas of freshwater fish of Russia in two volumes. V. 1. Moskva: Nauka, 2002. 381 p. (in Russian).

10. Weiss S., Knizhin I., Romanov V., Kopun T. Secondary contact between two divergent lineages of grayling *Thymallus* in the lower Enisey basin and its taxonomic implications // Journal of Fish Biology. 2007. V. 71. P. 371–386. doi: 10.1111/j.1095-8649.2007.01662.x

11. Romanov V.I. On the taxonomic composition of the graylings (Thymallidae) from the Ob and Yenisei river basins // International Journal of Environmental Studies. 2017. V. 74. No. 5. P. 845–853. doi: 10.1080/00207233.2017.1330602

12. Pravdin I.F. Guidelines to the Study of Fish. Moskva: "Food Industry" Publishing House, 1966. 221 p. (in Russian).

13. Mikodina E.V., Sedova M.A., Chmilevsky D.A., Mikulin A.E., Pyanova S.V., Poluektova O.G. Histology for Ichthyologists: experience and advice. Moskva: VNIRO, 2009. 112 p. (in Russian).

14. Complex hydrochemical and biological study of water quality and aquatic and near-aquatic ecosystems state: methodological guidelines. Part 1. Field research / Ed. T.I. Moiseenko. Tyumen: Tyumen State University, 2011. 128 p. (in Russian).

15. Complex hydrochemical and biological study of water quality and aquatic and near-aquatic ecosystems state: methodological guidelines. Part 2. Cameral research / Ed. T.I. Moiseenko. Tyumen: Tyumen State University, 2012. 304 p. (in Russian).

16. Bernet D., Schmidt H., Meier W., Burkhardt-Holm P., Wahli T. Histopathology in fish: proposal for a protocol to assess aquatic pollution // Journal Fish Diseases. 1999. No. 22. P. 25–34.

17. Zinoviev E.A., Bogdanov V.D. Morphobiological features of the Arctic grayling (*Thymallus arcticus*, Thymallidae) of the polar Urals // Veterinary of Kuban. 2012. No. 4. P. 22–24 (in Russian).

18. Zinoviev E.A., Bogdanov V.D. Comparative morphobiological analysis of the Arctic grayling (*Thymallus arcticus*, Thymallidae) of the northern and polar parts of

the Urals // Bulletin of the Astrakhan State Technical University. Series: fisheries. 2012. No. 2. P. 33–40 (in Russian).

19. Romanov V.I. Morphological variability of the Arctic grayling (*Thymallus arcticus* (Pallas, 1776)) of different lakes types in the Khatanga River basin (Taimyr Peninsula) and its connection to adaptations to mountain and plain conditions // News of Irkutsk State University. Series: Biology. Ecology. 2016. V. 18. P. 45–57 (in Russian).

20. Romanov V.I., Lavrentev S.Yu., Dyldin Yu.V. About morphology of the Arctic grayling (*Thymallus arcticus* (Pallas)) of the Kazym river basin (lower Ob) // Bulletin of Surgut State University. 2016. No. 3. P. 37–42 (in Russian).

21. Selyukov A.G., Shuman L.A., Nekrasov I.S. State of gonads in salmonid fishes of subarctic lakes of Yamal and Gydan // Bulletin of Tyumen University. Biomedical Sciences. 2012. No. 6. P. 31–40 (in Russian).

22. Faleeva T.I. Features of atresia process of the ovarian follicle in the ruff at different temperatures // Ecological plasticity of sexual cycles and reproduction of fish. Leningrad: LSU, 1975. P. 123–139 (in Russian).

23. Faleeva T.I. Results of experimental analysis of oogenesis disorders in fish // Problems of functioning of the reproductive system reliability in fish. Tr. Biol. NII. Sankt-Peterburg: SPbSU, 1997. No. 44. P. 84–90 (in Russian).

24. Vinogradov G.A. Processes of ionic regulation in freshwater fish and invertebrates. Moskva: Nauka, 2000. 216 p. (in Russian).

25. Matey V.E. Gills of freshwater teleost fishes: morphofunctional organization, adaptation, and evolution. Sankt-Peterburg: Nauka, 1996. 204 p. (in Russian).

26. Ampleeva A.V., Lozhnichenko O.V. Pathological changes of kidneys and gills in whitefish of the Volga-Caspian Basin // Vestnik AGTU. 2010. No. 2. P. 116–118 (in Russian).

27. Safikhanova H.M., Orudzheva A.M., Rustamov E.K. Histopathological changes in gill tissue in carp as a result of exposure to high concentrations of crude oil // Vestnik MGOU. Series “Natural Sciences”. 2012. No. 4. P. 62–67 (in Russian).

28. Lukin A.A., Lukina Yu.N. Problems of fish health in inland waterbodies of Russia // Researches of VNIRO. 2015. V. 157. P. 32–44 (in Russian).

29. Lukina Yu.N., Ponomarev V.I., Lukin A.A. Structural and functional changes in fish of background lakes of the Subpolar Urals // International Bulletin of Veterinary Medicine. 2018. No. 3. P. 129–139 (in Russian).

30. Zubareva O.N., Skripal'shchikova L.N., Greshilova N.V., Kharuk V.I. Zoning of landscapes exposed to technogenic emissions from the Norilsk mining and smelting works // Russian Journal of Ecology. 2003. V. 34. No. 6. P. 375–380. doi: 10.1023/a:1027356346112

31. Ershov Yu.I. Ecological and geochemical assessment of permafrost soils of the Central Siberian Plateau // Siberian Journal of Ecology. 2014. No. 6. P. 975–986 (in Russian).

Morphological variation in round goby, *Neogobius melanostomus* (Actinopterygii, Gobiidae) from the Black Sea

© 2023. R. E. Belogurova ORCID: 0000-0002-3101-7708

A. O. Kovalevsky Institute of Biology of the Southern Seas of RAS,
2, Nakhimov Ave., Sevastopol, Russia, 299011,
e-mail: prishchepa.raisa@yandex.ru

The article is focused on the morphological variation in the round goby, *Neogobius melanostomus* (Pallas, 1814) from the western coast of the Crimean Peninsula (Black Sea). A total of thirty-five plastic and seven meristic characters were measured in similar-sized males of the round goby. On average, gobies from the eastern part of the Karkinitzky Bay (the water area of the Bakalskaya Spit and the Samarchik Bay) were larger than those from the other two areas ($SL_{avr} = 109.2 \pm 0.9$ mm and $SL_{avr} = 111.0 \pm 1.9$ mm, respectively), which probably indicates the best trophic conditions in these areas. Gobies from the Donuzlav Lyman were smaller by the average values of the standard length ($SL_{avr} = 87.6 \pm 1.3$ mm). The differences between average values of the quantitative characteristics of compared samples were statistically significant. It was found that the heterogeneity of the ecological conditions of the habitats made it possible to form various variations of characters in the round goby. It was revealed that at least three population groups of round goby were formed near the western coast of Crimea: one of them was formed by fish from the Donuzlav estuary, the second – by gobies from the Samarchik Bay, the third – by a group of fish from the water area of the Bakalskaya Spit and Yarylgachskaya Bay. As the analysis of the correlations between the plastic characters and the values of the coordinates of the two canonical variables has shown, practically all the studied measurements ensure the discrimination of the samples of the round goby, however, the best discrimination along the first canonical axis (correlation coefficients more than 0.5) is provided by measurements on the body associated with the location of the pectoral, pelvic and anal fins, as well as the parameters of the jaw (length of the upper and lower jaws, distance between the eye and the angle of the mouth, and the width of the mouth). Such differences in the structure of the species population are associated, among other things, with the transformations of the fish population in the eastern part of the Karkinitzky Bay and the Donuzlav Lyman, caused by human economic activity.

Keywords: Round goby, Black Sea, plastic and meristic characters, variability, population.

УДК 597.556.333.1:591.4(262.5)

Морфологическое разнообразие популяции бычка-кругляка *Neogobius melanostomus* (Actinopterygii, Gobiidae) Чёрного моря

© 2023. Р. Е. Белогурова, н. с.,

Федеральный исследовательский центр

«Институт биологии южных морей имени А. О. Ковалевского РАН»,

299011, Россия, г. Севастополь, проспект Нахимова, д. 2,

e-mail: prishchepa.raisa@yandex.ru

Рассматривается структура популяции бычка-кругляка западного побережья Крымского полуострова. Изучено 35 пластических и 7 меристических признаков у самцов бычка-кругляка сходных размеров. Выявлены статистически значимые отличия в средних значениях признаков между выборками рыб из трёх районов Каркинитского залива и лимана Донузлав. В среднем бычки из восточной части Каркинитского залива (акватория Бакальской косы и залив Самарчик) оказались крупнее, чем на двух других обследованных участках ($SL_{cp} = 109,2 \pm 0,9$ мм и $SL_{cp} = 111,0 \pm 1,9$ мм соответственно), что, вероятно, свидетельствует о лучших трофических условиях в указанных районах. Рыбы из лимана Донузлав оказались по средним значениям стандартной длины мельче ($SL_{cp} = 87,6 \pm 1,3$ мм). Установлено, что неоднородность экологических условий мест обитания позволили сформировать у бычка-кругляка различные вариации признаков. Выявлено, что у западного побережья Крыма сформировались по меньшей мере три популяционные группировки бычка-кругляка: одна из них образована рыбами из лимана Донузлав, вторая – бычками из залива Самарчик, третья – группой рыб из акватории Бакальской косы и Ярылгачской бухты. Как показал анализ корреляционных связей между пластическими признаками и значениями координат двух канонических переменных,

практически все изучаемые промеры обеспечивают дискриминацию выборок бычка-кругляка, однако наилучшую дискриминацию по первой канонической оси (коэффициенты корреляции более 0,5) обеспечивают промеры на теле, связанные с расположением грудного, брюшного и анального плавников, а также параметры челюсти (длина верхней и нижней челюстей, расстояние между глазом и углом рта и ширина рта). Подобные различия в структуре популяции вида связаны в том числе с преобразованиями рыбного населения в восточной части Каркинитского залива и лимана Донузлав, вызванными хозяйственной деятельностью человека.

Ключевые слова: бычок-кругляк, Каркинитский залив, лиман Донузлав, Чёрное море, пластические и меристические признаки, изменчивость, популяция.

The round goby *Neogobius melanostomus* (Pallas, 1814) is a Ponto-Caspian endemic species; its range includes the basins of the Black, Marmara, Caspian and Azov seas. The round goby is an important commercial species throughout its entire range [1–5]. The round gobies are demersal that prefers brackish coastal waters of seas and estuaries. The species is one of the most common goby species off the coast of the Crimean Peninsula [4, 5]. The high ecological plasticity and invasive potential are characteristic of the species, which actively occupies new habitats. Thus, the round goby has distributed upstream of large European rivers and has established stable populations in new reservoirs; it was also accidentally introduced with ballast waters into the Baltic Sea basin and the Great Lakes in North America [6–12].

Gobiidae are predominantly non-migratory or short-distance migratory fishes that form local morphologically distinct groups [4]. Previously, several studies investigated the population structure of the round goby in both native and introduced habitats [1, 6, 9–12]. For example, the length of the pectoral and pelvic fins, as well as the height of the anal fin are greater in the population of the round goby from the Sea of Azov in comparison with population from the Black Sea, while the height and thickness of the body show the opposite relationship. This is attributable to the nature of nutrition and movement [1]. The caudal peduncle length and the interorbital distance are greater in the round goby from the Dnieper population which indicates rheophily of these fish [1]. The round goby from the Kakhovka Reservoir of the Dnieper has a greater height of the dorsal fins and reduced length and width of the pelvic fin as well as the reduced length of the pectoral, anal and caudal fins in comparison with individuals from the Sea of Azov bays; this difference is associated with the hydrological conditions of the reservoirs [10]. The reduction of the number of fin rays and vertebrae in compare with gobies from the native range was found in the population of the round goby in the Southeast Baltic [12]. At the same time, the reduction of the number of rays

in the dorsal and caudal fins was also found in the round goby from the Great Lakes of North America [6].

At the same time, the specific characteristics of the round goby population structure in the Black Sea coast of Crimean Peninsula, especially in the Karkinitsky Gulf and Donuzlav Lyman that have been subjected to an intense anthropogenic stress for more than 50 years, are still poorly known.

The Karkinitsky Gulf is the largest in the Black Sea and the Sea of Azov and has unique hydrochemical and morphological characteristics. The Karkinitsky Gulf is partitioned by the Bakal sandy spit and Bakal shoal into two parts, the eastern shallow part and the deep western part [5, 13]. During the function of the North Crimean Canal until 2014 the eastern part of the gulf was influenced by freshwater discharge, resulting in the reduced salinity in some of its smaller bays (Samarchik and Chatyrlitsky) [5].

As for Donuzlav Lyman, it stands out among the other Black Sea lymans because of its size, configuration and geomorphology. The lyman is separated from the Black Sea by the Belyaus sandy spit. Previously, it was the second largest salt lake in the Crimea, its salinity reaches up to 95‰. However, in 1961, the navigable channel was open in the spit; as a result the salinity of Donuzlav Lyman has substantially dropped. Thus, the modern fish fauna in the Lyman has been formed over the past few decades [14].

Hence, taking into account the high ecological plasticity of the round goby, as well as its ability to form morphologically distinct groups depending on the environmental conditions against the backgrounds of the anthropogenic changes in above mentioned water areas, the goal of this study is to evaluate the morphological variability of the species from different localities of the Crimean coast of the Black Sea using plastic and meristic characters.

Material and Methods

Ninety-eight males of the round goby were collected in November 2015 and July 2017 dur-

ing the expedition of the A.O. Kovalevsky Institute of Biology of the Southern Seas of RAS in the Karkinitzky Gulf (3 samples) and the Donuzlav Lyman (1 sample) (Fig. 1).

In the Karkinitzky Gulf samples were collected in the Samarchik Bay, the water area of the Bakalskaya spit (the region of the settlement of Aurora – the eastern shallow part of the Karkinitzky Gulf) and in the Yarylgach Bay (the western deepwater part of the Karkinitzky Gulf) (Fig. 1). The ichthyological material was collected using shrimp trap “Venter” with a mesh size of 6.5–7.5 mm, where round goby is one of the most common by-catch species [15].

The mature males of similar age (2+ and 3+) and similar size were selected for the morphometric studies to exclude a possible factor of sexual and age variation. All samples of the round goby were fixed with 4% formaldehyde solution until further morphological analysis. In addition, the material (deposit No. AB-1248) from the Center of joint usage “The Collection of Hydrobionts of the Oceans” of the A.O. Kovalevsky Institute of Biology of the Southern Seas of RAS, was used.

A total of 35 plastic and seven meristic characters of *N. melanostomus* were measured. The round goby body measurements (Fig. 2) were evaluated using the callipers with an error of +0.1 mm [11, 16]. Ratios relative to the standard length (*SL*) and head length (*HL*) were also calculated.

The statistical analysis was performed with STATISTICA 10.0 software packages. The normality of the sample’s distribution was verified using the Shapiro-Wilk criterion [17]. The differences were supposed to be reliable at the

confidence level of 5% ($p < 0.05$). The basic and multivariate statistical methods such as correlation analysis, discriminant and cluster analyses were performed. The significance of the differences between the means was evaluated using Student’s test [18]. To assess the diversity in the complexes of characters the gobies from different regions, the Kullback-Leibler’s information criterion (*D*) was used [19].

Results and Discussion

According to the obtained data, gobies from the eastern part of Karkinitzky Gulf (the Bakalskaya spit and Samarchik Bay) were larger than gobies from two other regions ($SL_{avr} = 109.2 \pm 0.9$ mm and $SL_{avr} = 111.0 \pm 1.9$ mm respectively), which could indicate better feeding conditions in these areas. The difference is provided at $t > 2.677$ between standard length of gobies from the studied areas. The standard length of the fishes from the Donuzlav Lyman was smaller ($SL_{avr} = 87.6 \pm 1.3$ mm) than the standard lengths of the gobies collected in the Karkinitzky Gulf.

The measurements of the fish in the samples varied insignificantly. The highest variability ($Cv > 10$) was noted for (percentage of *SL*) *ih* for the round goby from the Samarchik Bay and the Yarylgach Bay and *pl* for the round goby from the Bakalskaya Spit. The head parameter (percentage of *HL*) *io* was the most variable ($Cv > 10$) among the samples from three studied regions, excluding Samarchik Bay. The most variability among meristic characters ($Cv > 5$) was noted for the round goby from the Bakalskaya Spit.

The differences between several characters of the round goby from four regions of the Black Sea coast of Crimea are statistically significant resulting according to the Student’s test. In such a manner, the significant differences in most of characters (at $t > 2.677$) were observed between samples from Karkinitzky Gulf and Donuzlav Lyman. Hence, the samples of round goby from geographically distant Samarchik Bay and Donuzlav have significant differences in 25 plastic and four meristic characters. The samples from the Bakalskaya spit and the Donuzlav Lyman had differences in 22 plastic and two meristic parameters. In turn, the round goby from the Yarylgach Bay and Donuzlav Lyman had significant differences in 19 plastic and one meristic character.

The geographical distance between the Donuzlav Lyman and three other studied water areas, feeding conditions and the history of the formation of the round goby population in these



Fig. 1. Map of the studied area

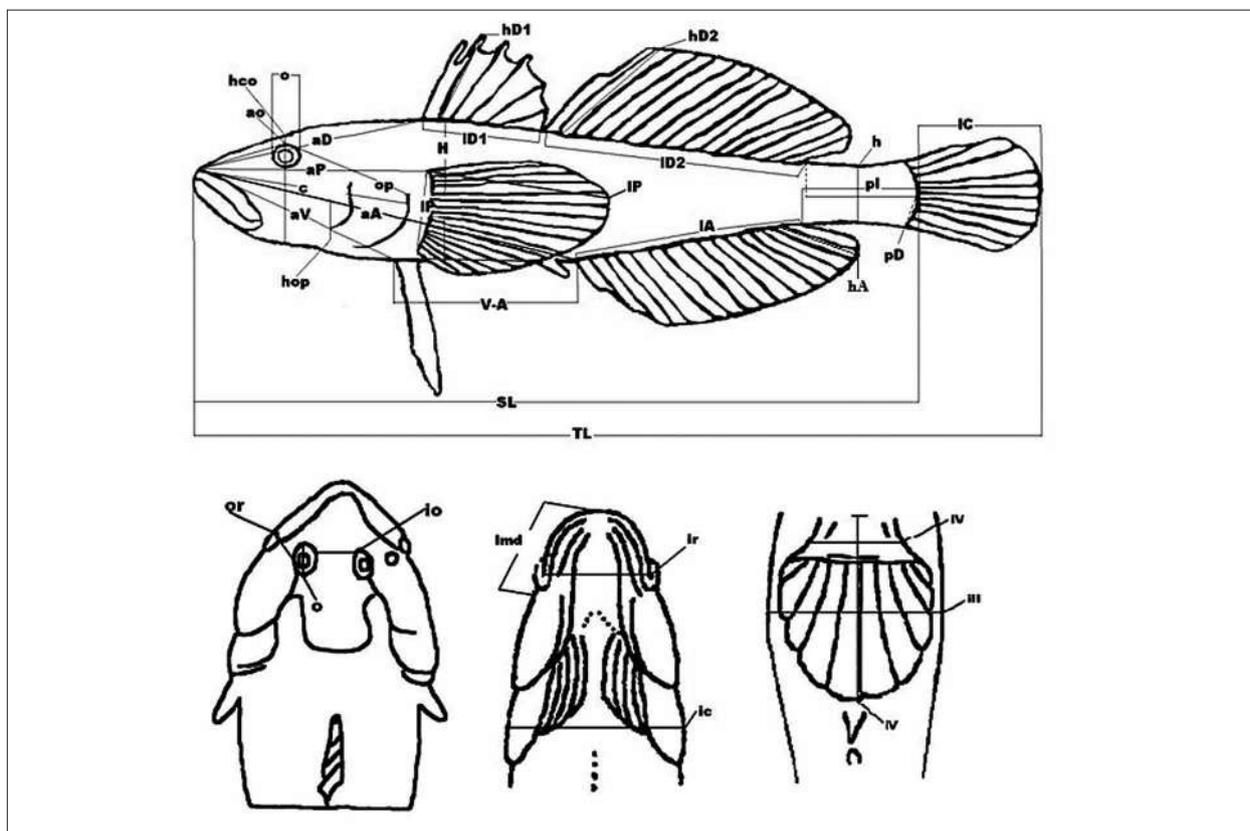


Fig. 2. Scheme of the round goby measurements [11, with additions]

Morphometric measurements of body: TL – total length; SL – standard length; H – maximum body depth; h – caudal peduncle depth; iH – maximum body width; ih – caudal peduncle width; aD – predorsal distance; pD – postdorsal distance; aP – prepectoral distance; aV – prepelvic distance; aA – preanal distance; V-A – pelvic-anal distance; pl – caudal peduncle length; lD1 – length of first dorsal fin base; hD1 – first dorsal fin depth; lD2 – length of second dorsal fin base; hD2 – second dorsal fin depth; lA – length of anal fin base; hA – anal fin depth; lP – pectoral fin length; iP – width of pectoral fin base; lV – pelvic fin length; iV – width of pelvic fin base; iC – caudal fin length; HL – head length.

Morphometric measurements of head: ic – head width; ao – preorbital distance; o – horizontal eye diameter; op – postorbital distance; io – interorbital distance; lm – upper jaw length; lmd – lower jaw length; or – distance between eye and corner of mouth; hop – cheek depth; ir – mouth width; hco – head depth through middle of eye.

Meristic characters: D1 – number of first dorsal fin spines; D2 – number of second dorsal fin rays; A – number of anal fin rays; P – number of pectoral fin rays; C – number of caudal fin rays; squ – number of transverse rows of scales

water areas could be a reason for identified differences. As shown in [20], the formation of the round goby population in the Karkinitzky Gulf was significantly affected by the invasion of fish fauna from the Dnieper River faunistic complex during the functioning of the North Crimean Canal, while in the Donuzlav Lyman the Black Sea group of the round goby was historically formed.

The pairwise comparison of round goby from the water area of Bakalskaya spit, Samarchik Bay and Yarylgach Bay showed reliable differences between the first and second regions and between the first and third regions by 10 plastic characters. At the same time, the gobies from distant regions of Karkinitz Gulf, Yarylgach Bay and Samarchik Bay differ reliably only by five

plastic and four meristic characters. The nature of the latter differences requires further research.

The degrees of similarity between regions were estimated using a cluster analysis based on the Kullback-Leibler divergence index (*D*).

As shown in Figure 3, the round gobies from the Samarchik Bay and the Yarylgach Bay are united by both plastic and meristic characters at the lowest level of divergence and are clustered with gobies from the Bakalskaya Spit. In turn, the gobies from the Donuzlav Lyman form a cluster separate from three water regions of the Karkinitzky Bay.

The discriminant canonical analysis was carried out to compare round gobies from 4 above mentioned regions. The distribution of individu-

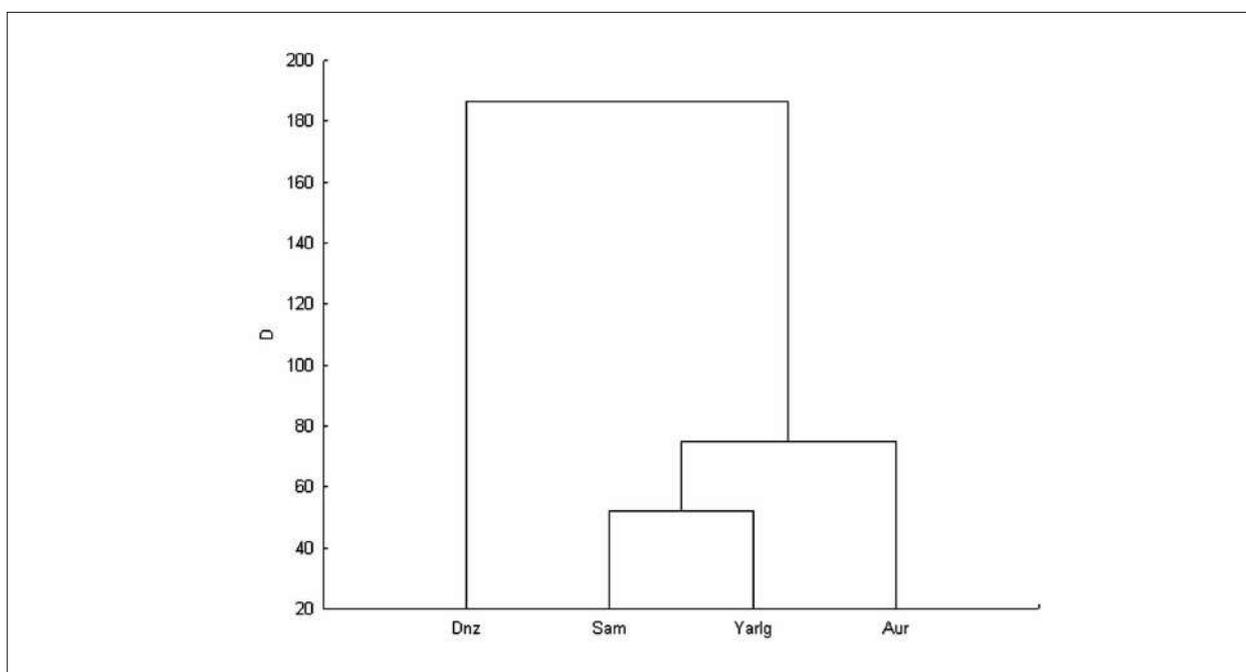


Fig. 3. The results of a cluster analysis based on a complex of all studied characters of the samples of the round goby from 4 regions of the Black Sea: Dnz – Donuzlav Lyman, Sam – Samarchik Bay, Yarlq – Yarylgach Bay, Aur – Bakalskaya Spit

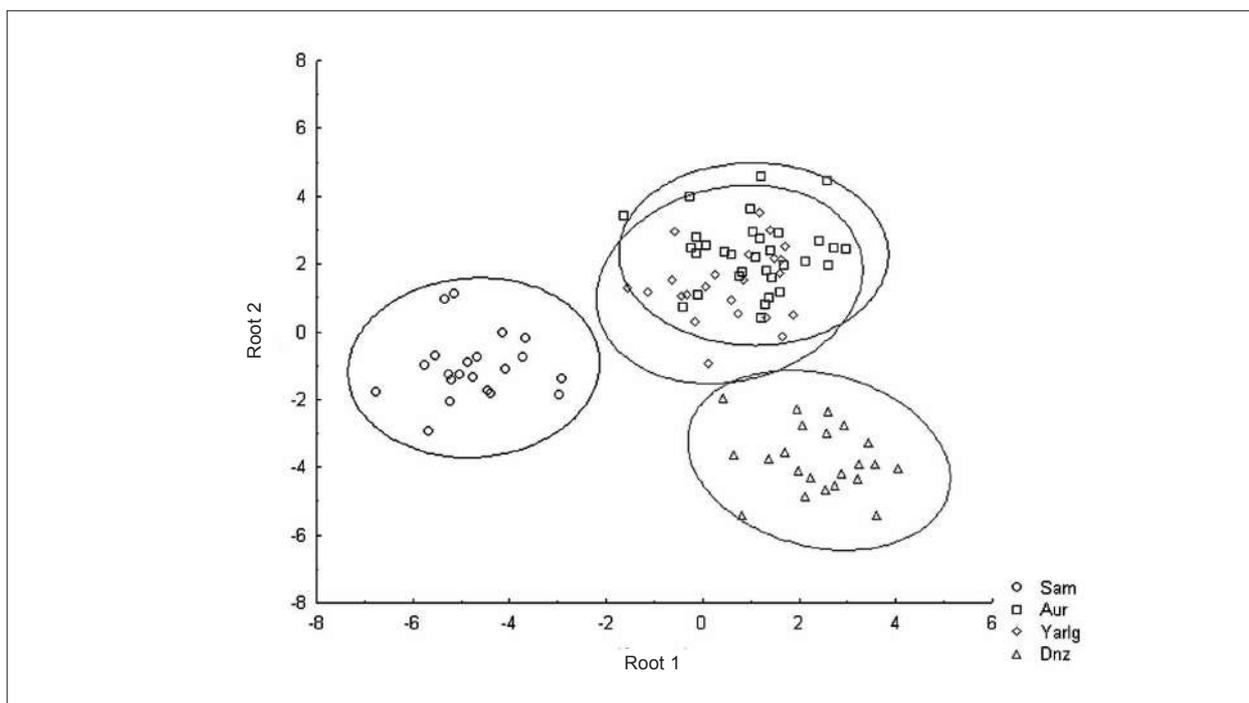


Fig. 4. Scatterplot of canonical scores for body dimensions of round goby from 4 regions of the Black Sea (results of discriminant analysis): Dnz – Donuzlav Lyman, Sam – Samarchik Bay, Yarlq – Yarylgach Bay, Aur – Bakalskaya Spit

als within the two canonical axes according to the plastic characters is shown on Figure 4. As illustrated (Fig. 4) the studied individuals are distributed among three groups along the Root 2: gobies from the Samarchik Bay; gobies from the Donuzlav Lyman; and the third group com-

bine into one the gobies from the Bakalskaya spit and the Yarylgach Bay. In turn along the Root 1 the individuals from the Donuzlav Lyman, the Bakalskaya spit and the Yarylgach bay are united, while the goby individuals from the Samarchik Bay form a separate group. The

largest value of the square Mahalanobis distance of (58.6) was obtained for Samarchik Bay and Donuzav Lyman, and the smallest (27.7) for the Bakalskaya Spit and the Yarygach Bay.

A region-based discrimination is provided by both canonical axes for almost all measurements. However, the best discrimination along the first canonical variable (correlation coefficients more than 0.50) is provided by the parameters such as *TL*, *SL*, *aP*, *aV*, *aA*, *iP*, *iV*, *HL*, *ic*, *lm*, *lmd*, *or*, *ir* and *hco*. Discrimination along the second canonical variable is ensured by characters as *TL*, *SL*, *H*, *iH*, *ih*, *aD*, *pD*, *aP*, *aV*, *aA*, *VA*, *lD1*, *hD1*, *lD2*, *hD2*, *hA*, *lP*, *iP*, *lV*, *iV*, *lC*, *HL*, *hcz*, *ic*, *ao*, *o*, *op*, *io*, *lm*, *lmd*, *or*, *hop*, *ir* and *hco*.

In this case, the noted differences between the round goby from the studied areas are associated with body sizes (*TL*, *SL*) and with characters correlate with size. As a result, the gobies from Samarchik Bay are discriminated along both canonical axes.

It is known that variation of morphological characters in fish can be connected to the peculiarities of nutrition, movement and reproduction [21]. The observed differences between round goby samples from the 4 areas of the Black Sea may also be connected with the specific habitat conditions. So, the increasing of the anterior part of the body (*H*, *iH*, *H*, *aD*, *H*), as well as the caudal peduncle width (*ih*) and depth (*h*) of the round goby from the the Bakalskaya spit might be linked to the overall larger fish size from this area. It is also possible that the gobies from the water area of the Bakalskaya spit have increased load on the anterior part of the body and the caudal fin due to the greater water flow rate in the area. In addition, gobies from the Bakalskaya spit had larger head length (*HL*) and characters expressed inpercentage of *HL* (head width (*ic*), preorbital distance (*ao*), postorbital distance (*op*), and interorbital distance (*io*) in comparison with gobies from other water areas.

The caudal peduncle was longer in the round goby from the Donuzlav Lyman than in gobies from three other areas (characters *pl* and *pD* was increased), which also indicates a greater load on this part of the body, for example, during foraging movement.

The values of *aP*, *aV*, *aA* and *V-A* in the round gobies from Samarchik Bay are larger than in gobies from other localities. According to [21], the values of mentioned characters can considerably vary during the formation of gonads.

The increased values of the depth of the first and second dorsal fins (*hD1* and *hD2*), as well

as the length of the pelvic fin (*lV*) and pectoral fin (*lP*) were recorded in the round gobies from the Donuzlav Lyman in comparison with other localities. However, the increase of these measurements may be associated with the spawning changes in goby males, because the material was collected in the summer [1].

Measurements that centre around the size of the mouth (the upper (*lm*) and lower (*lmd*) jaws length, mouth width (*ir*) and distance between eye and corner of mouth (*or*)) were larger in the gobies from Samarchik Bay, and were the smallest in the gobies from the Donuzlav Lyman. This is possibly connected with the overall larger size and greater food availability for round gobies in the Samarchik Bay.

Conclusions

Thus, at least three distinct intrapopulation groups of the round goby were identified at the western coast of the Crimean Peninsula: first includes the gobies from the Donuzlav Lyman; second includes the gobies from Samarchik Bay, whereas third includes fishes from the Bakalskaya Spit and the Yarylgach Bay. Almost all studied measurements (with exception of *ih* along the first canonical axis) had significant role in discrimination among the groups, as it was shown by the result of our investigation.

It is our point that two major reasons may be responsible for the observed differences. The round gobies from different habitats may have differences in average body sizes under various trophic conditions in diverse water areas, as well as under different stoking densities of individuals. In such an event, the observed differences in size of the gobies from different habitats represent the modification variability.

However, it seems to be more likely that such differences may be associated with the history of the fish population forming in the studied areas. So, the Black Sea group of round gobies was historically formed in the Donuzlav Lyman, while in the Karkinitzky Bay, the formation of the round goby populations was influenced by the invasion of the species representatives of the Dnieper faunistic complex during the functioning of the North Crimean Canal. Thus, the observed differences may be related to the fact that at least two populations of round goby exist in these regions.

This study was carried out as part of the state assignment of the A.O. Kovalevsky Institute of Biology of the Southern Seas of RAS on the topics "Fun-

damental studies of the population biology of marine animals, their morphological and genetic diversity” No. 121040500247-0. Author is also grateful to Dr. I. Dovgal, Professor at the A.O. Kovalevsky Institute of Biology of the Southern Seas of RAS, for translating the manuscript into English.

Литература

1. Смирнов А.И. Фауна Украины: в 40 т. Т. 8. Рыбы. Вып. 5. Окунеобразные (бычковидные), скорпенообразные, камбалообразные, присоскопорообразные, удильщицеобразные. Киев: Наукова думка, 1986. 320 с.
2. Pinchuk V.I., Vasil'eva E.D., Vasil'ev V.P., Miller P.J. *Neogobius melanostomus* (Pallas, 1814) // The freshwater fishes of Europe. V. 8/I / Ed. P.J. Miller. Aula: Wiebelsheim, 2003. P. 293–345.
3. Васильева Е.Д. Рыбы Чёрного моря. Определитель морских, солоноватоводных, эвригаллиных и проходных видов с цветными иллюстрациями, собранными С. В. Богородским. Москва: Изд-во ВНИРО, 2007. 238 с.
4. Манило Л.Г. Рыбы семейства бычковые (Perciformes, Gobiidae) морских и солоноватых вод Украины. Киев: Наукова Думка, 2014. 243 с.
5. Болтачев А.Р., Карпова Е.П. Морские рыбы Крымского полуострова. 2-е изд. Симферополь: Бизнес-Информ, 2017. 376 с.
6. Смирнов А.И. Бычок кругляк *Neogobius melanostomus* (Pisces, Gobiidae) за пределами ареала: причины, степень распространения, возможные последствия // Вестник зоологии. 2001. Т. 35. № 3. С. 71–77.
7. Skóra K.E., Rzeźnik J. Observations of food composition of *Neogobius melanostomus* Pallas 1811 (Gobiidae, Pisces) within the area of the Gulf of Gdańsk (Baltic Sea) // J. Great Lakes Res. 2001. V. 27. P. 290–2998.
8. Roche K., Janač M., Šlapansky L., Mikl L., Kopeček L., Jurajda P. A newly established round goby (*Neogobius melanostomus*) population in the upper stretch of the river Elbe // Knowledge and Management of Aquatic Ecosystems. 2015. No. 416. Article No. 33.
9. Lávrinčíková M., Kováč V., Katina S. Ontogenetic variability in external morphology of round goby *Neogobius melanostomus* from Middle Danube, Slovakia // J. Appl. Ichthyol. 2005. No. 21. P. 328–334.
10. Demchenko V.O., Tkachenko M.Y. Biological characteristics of the round goby, *Neogobius melanostomus* (Pallas, 1814), from different water bodies // Archives of Polish Fisheries. 2017. V. 25. No. 1. P. 51–61.
11. Diripasko O.A., Zabroda T.A. Morphometric variability in round goby *Neogobius melanostomus* (Perciformes: Gobiidae) from the Sea of Azov // Zoosystematica Rossica. 2017. V. 26. No. 2. P. 392–405.
12. Кодухова Ю.В., Боровикова Е.А., Ежова Е.Е., Гуцин А.В. Особенности морфологии бычка-кругляка (*Neogobius melanostomus*) юго-восточной Балтики // Региональная экология. 2017. № 3 (49). С. 65–74.

13. Люция Чёрного моря (№ 1244). Министерство обороны Союза ССР. Главное управление навигации и океанографии, 1987. 853 с.
14. Зуев Г.В., Болтачев А.Р. Влияние подводной добычи песка на экосистему лимана Донузлав // Экология моря. 1999. Вып. 48. С. 5–9.
15. Прищепа Р.Е. Структурные характеристики сообществ рыб Каркинитского залива в ноябре 2015 года // «Pontus Euxinus 2017»: Тезисы X Всерос. науч.-практ. конф. молодых учёных по проблемам водных экосистем, в рамках проведения Года экологии в Российской Федерации. Севастополь: DigitPrint, 2017. С. 171–174.
16. Правдин И.Ф. Руководство по изучению рыб. М.: Пищевая промышленность, 1966. 374 с.
17. Халафян А.А. Statistica 6. Статистический анализ данных. М.: ООО Бином-Пресс, 2007. 512 с.
18. Лакин Г.Ф. Биометрия. Учебное пособие для биол. спец. вузов, 4-е изд., перераб. и доп. М.: Высшая школа, 1990. 352 с.
19. Андреев В.Л., Решетников Ю.С. Исследование внутривидовой морфологической изменчивости сига *Coregonus lavareus* (L.) методами многомерного статистического анализа // Вопросы ихтиологии. 1977. Т. 17. Вып. 5. С. 862–878.
20. Карпова Е.П., Болтачев А.Р. Рыбы внутренних водоёмов Крымского полуострова. Симферополь: Бизнес-Информ, 2012. 200 с.
21. Митрофанов В.П. Экологические основы морфологического анализа рыб. Алма-Ата: КазГУ, 1977. 34 с.

References

1. Smirnov A.I. Fauna of Ukraine: in 40 volumes. V. 8. Fish. No. 5. Perciformes (Gobiiformes), Scorpaeniformes, Pleuronectiformes, Gobiesociformes, Lophiiformes. Kiev: Naukova dumka, 1986. 320 p. (in Russian).
2. Pinchuk V.I., Vasil'eva E.D., Vasil'ev V.P., Miller P.J. *Neogobius melanostomus* (Pallas, 1814) // The freshwater fishes of Europe. V. 8/I / Ed. P.J. Miller. Aula: Wiebelsheim, 2003. P. 293–345.
3. Vasil'eva E.D. Fish of the Black Sea. Key to marine, brackish-water, euryhaline and anadromous species with color illustrations collected by S.V. Bogorodsky. Moskva: Izd-vo VNIRO, 2007. 238 p. (in Russian).
4. Manilo L.G. Fish of the goby family (Perciformes, Gobiidae) of the sea and brackish waters of Ukraine. Kiev: Naukova Dumka, 2014. 243 p. (in Russian).
5. Boltachev A.R., Karpova E.P. Marine fish species of the Crimean Peninsula. 2nd edition: revised and enlarged. Simferopol': BiznesInform, 2017. 376 p. (in Russian).
6. Smirnov A.I. The round goby *Neogobius melanostomus* (Pisces, Gobiidae) is found outside of its area: Reasons, distribution rate, probable after-effects // Vestnik zoologii. 2001. No. 35 (3). P. 71–77 (in Russian).

7. Skóra K.E., Rzeźnik J. Observations of food composition of *Neogobius melanostomus* Pallas 1811 (Gobiidae, Pisces) within the area of the Gulf of Gdańsk (Baltic Sea) // J. Great Lakes Res. 2001. V. 27. P. 290–299.
8. Roche K., Janač M., Šlapansky L., Mikl L., Kopeček L., Jurajda P. A newly established round goby (*Neogobius melanostomus*) population in the upper stretch of the river Elbe // Knowledge and Management of Aquatic Ecosystems. 2015. No. 416. Article No. 33. doi: 10.1051/kmae/2015030
9. Lávrinčíková M., Kováč V., Katina S. Ontogenetic variability in external morphology of round goby *Neogobius melanostomus* from Middle Danube, Slovakia // J. Appl. Ichthyol. 2005. No. 21. P. 328–334. doi: 10.1111/j.1439-0426.2005.00677.x
10. Demchenko V.O., Tkachenko M.Y. Biological characteristics of the round goby, *Neogobius melanostomus* (Pallas, 1814), from different water bodies // Archives of Polish Fisheries. 2017. V. 25. No. 1. P. 51–61. doi: 10.1515/aopf-2017-0006
11. Diripasko O.A., Zabroda T.A. Morphometric variability in round goby *Neogobius melanostomus* (Perciformes: Gobiidae) from the Sea of Azov // Zoosystematica Rossica. 2017. V. 26. No. 2. P. 392–405. doi: 10.31610/zsr/2017.26.2.392
12. Kodukhova Yu.V., Borovikova E.A., Ezhova E.E., Gushchin A.V. Features of the morphology of the round goby (*Neogobius melanostomus*) of the southeastern Baltic // Regional'naya ekologiya. 2017. No. 3 (49). P. 65–74 (in Russian).
13. Sailing of the Black Sea (No. 1244). Ministerstvo oborony Soyuza SSR. Glavnoe upravlenie navigatsii i okeanografii, 1987. 853 p. (in Russian).
14. Zuev G.V., Boltachev A.R. Impact of underwater sand mining on the ecosystem of the Donuzlav Lyman // Ekologiya morya. 1999. No. 48. P. 5–9 (in Russian).
15. Prishchepa R.E. Structural characteristics of fish communities in the Karkinitzky Bay in November 2015 // Pontus Euxinus 2017: tez. X Vseros. nauch.-prakt. konf. molodyh uchenyh po problemam vodnyh yekosistem. Sevastopol': DigitPrint, 2017. P. 171–174 (in Russian).
16. Pravdin I.F. Guide to the study of fish. Moskva: Pishchevaya promyshlennost', 1966. 374 p. (in Russian).
17. Khalafyan A.A. Statistics 6. Statistical data analysis. Moskva: OOO Binom-Press, 2007. 512 p. (in Russian).
18. Lakin G.F. Biometrics. Moskva: Vysshaya shkola, 1990. 352 p. (in Russian).
19. Andreev V.L., Reshetnikov Yu.S. Investigation of intraspecific morphological variability of whitefish *Koregonus lavarus* (L.) by methods of multivariate statistical analysis // Voprosy ikhtiologii. 1977. No. 17 (5). P. 862–878 (in Russian).
20. Karpova E.P., Boltachev A.R. Fish of the inner water reservoirs in the Crimean Peninsula. Simferopol: "Business-Inform", 2012. 200 p. (in Russian).
21. Mitrofanov V.P. Ecological foundations of morphological analysis of fish. Alma-Ata: KazGU, 1977. 34 p. (in Russian).

Микроскопические грибы в почвах лесных экосистем Воронежского государственного природного биосферного заповедника

© 2023. Н. Н. Назаренко¹, к. б. н., доцент,
И. Д. Свистова², д. б. н., профессор,

¹Воронежский государственный аграрный университет им. императора Петра I,
394087, Россия, г. Воронеж, ул. Мичурина, д. 1,

²Воронежский государственный педагогический университет,
394043, Россия, г. Воронеж, ул. Ленина, д. 86,
e-mail: talalajko@mail.ru

Дана оценка видового разнообразия и выявлен состав почвенных микроскопических грибов (микромикетов), характерных для лесных экосистем подзоны типичной лесостепи. Изучение микобиоты было проведено в разных биотопах смешанных и широколиственных лесов, расположенных на территории Воронежского государственного природного биосферного заповедника (Россия). Из лесных почв выделено и идентифицировано 43 вида микромикетов из 20 родов, относящихся к 6 семействам и 3 классам.

В комплекс типичных почвенных микромикетов заповедника входят 19 видов. Это нетоксигенные, медленно растущие олиготрофные, мезофильные и психрофильные виды. Состав случайных включал 24 вида, в основном, это быстро растущие сапротрофы, среди которых присутствуют и потенциально фитопатогенные и токсигенные виды. Состояние комплекса микромикетов почв заповедника характеризуется высокими показателями биоразнообразия и низким индексом доминирования. По принятой в микологии градации, это соответствует адаптивной зоне «гомеостаза». Полученные результаты могут быть использованы для оценки и прогнозирования экологического состояния почв с помощью микоиндикации в данной природно-климатической зоне.

Ключевые слова: лесные экосистемы, почвенные микромикеты, биоразнообразие, таксономическая структура.

Microscopic fungi in the soils of forest ecosystems of the Voronezh State Natural Biosphere Reserve

© 2023. N. N. Nazarenko¹ ORCID: 0000-0002-6309-2219^{*}
I. D. Svistova² ORCID: 0000-0003-0275-5645^{*}

¹Voronezh State Agrarian University,
1, Michurina St., Voronezh, Russia, 394087,

²Voronezh State Pedagogical University,
86, Lenina St., Voronezh, Russia, 394043,
e-mail: talalajko@mail.ru

The species diversity is estimated and the composition of soil microscopic fungi (micromycetes) characteristic of forest ecosystems of the typical forest-steppe subzone is revealed. The study of mycobiota was carried out in various biotopes of mixed and broad-leaved forests located on the territory of the Voronezh State Natural Biosphere Reserve (Russia). 43 species of micromycetes from 20 genera belonging to 6 families and 3 classes were isolated and identified from forest soils.

The complex of typical soil micromycetes of the reserve includes 19 species. These are nontoxigenic, slow-growing oligotrophic, mesophilic, and psychrophilic species. The composition of the group included 24 species, mainly fast-growing saprotrophs, among which there are potentially phytopathogenic and toxigenic species. The state of the complex of micromycetes of the reserve's soils is characterized by high indicators of biodiversity and equalization, and a low index of dominance. According to the gradation accepted in mycology, this corresponds to the adaptive zone of "homeostasis". The results obtained can be used to assess and predict the ecological state of the soils of forest ecosystems using mycoindication in this natural and climatic zone.

Keywords: forest ecosystems, soil micromycetes, biodiversity, taxonomic structure.

В настоящее время уделяется пристальное внимание особо охраняемым природным территориям (ООПТ), имеющим огромное значение в сохранении биоразнообразия и поддержании естественных ландшафтов. В условиях значительной антропогенной трансформации окружающей среды особенно важны такие работы для заповедников, где ведётся инвентаризация видового состава всех групп организмов и анализ их состояния в будущем.

В лесных экосистемах микроскопические грибы (микромикеты) являются неотъемлемым гетеротрофным компонентом, участвуют в деструкции органических веществ, гумусообразовании и поддержании круговорота биогенных элементов [4]. Микромикеты активны в широком интервале экологических факторов; обладают большой генетической изменчивостью; способны быстро реагировать на действие неблагоприятных факторов среды [2, 3]. Многие авторы указывают на высокую информативность показателей структуры микобиома при биомониторинге природных и антропогенных экосистем [4–6]. Тем не менее, на сегодняшний день сведений о видовом разнообразии почвообитающих грибов различных регионов как нашей страны, так и мира, недостаточно [5, 7].

Природный комплекс Воронежского государственного природного биосферного заповедника им. В. М. Пескова (Воронежский заповедник) является эталоном биогеоценотического покрова. В 1923 г. впервые получил природоохранный статус территории, где все компоненты были изъяты из хозяйственной деятельности, а в 1985 г. заповедник был включён в список ЮНЕСКО. Микологические исследования на ООПТ крайне необходимы для понимания механизмов устойчивого функционирования лесных экосистем. Сведений о составе микобиоты Воронежского заповедника совсем немного. В большей части они касаются изучения биоразнообразия макромицетов. Экологическая группа почвенных микромикетов оставалась до последнего времени неисследованной.

В связи с этим цель настоящей работы – изучение видового состава и структуры почвенных микроскопических грибов в лесной экосистеме Воронежского государственного природного биосферного заповедника.

Объекты и методы исследования

Исследования микобиоты проводили в вегетационный сезон 2015–2017 гг. на территории Воронежского заповедника, расположенного в

подзоне типичной лесостепи центральной части Европейской России. Территория заповедника – это покрытая лесом равнина надпойменно-террасового типа. Образцы почв отбирали в следующих лесных экосистемах (биотопах): I надпойменная терраса реки Воронеж (сосняки, осоковые фитоценозы); II надпойменная терраса р. Воронеж (сосняки, дубняки и осинники, лугово-неморальные); III надпойменная терраса р. Воронеж (дубняки, сосняки и осинники, разнотравье); IV надпойменная терраса р. Воронеж (березняки и осинники, лугово-боровые фитоценозы). Всего за период исследования было отобрано 60 почвенных образцов из верхних органических горизонтов почв, характерных для данных биотопов. На низких (I и II) террасах под смешанными лесами сформировались дерново-лесные почвы лёгкого гранулометрического состава, а на высоких (III и IV) террасах под широколиственными лесами – серые почвы песчано-супесчаного состава с подстилающим суглинком [8].

Микромикеты выделяли общепринятым методом серийных разведений с последующим высевом почвенной суспензии на агаризованную среду Чапека [9]. Анализ биологического разнообразия микроскопических грибов выполнен на основе культурально-морфологических признаков с использованием классических определителей для конкретной таксономической группы. Наименование видов и систематическое положение дано по базе данных «Index Fungorum» (2017).

Для характеристики разнообразия комплексов микромикетов использовали ряд структурных показателей. Представленность выделенных видов в структуре микобиома характеризовали по критериям пространственной и временной частоты встречаемости и плотности видов [10]. Типичными считали виды грибов с частотами встречаемости более 30%, остальные виды – случайные. К рангу доминантов относили виды с частотами встречаемости более 60%; к рангу часто встречающихся – с временной встречаемостью более 60%, а пространственной встречаемостью более 30%; к рангу редких – с встречаемостью от 30 до 60%. Для оценки разнообразия микобиома рассчитывали различные индексы: Шеннона (H), Симпсона (C), Пиелу (U). Обработку данных проводили в программах Excel и Statistica.

Результаты и обсуждение

Таксономический состав почвенных микромикетов лесного массива Воронежского

заповедника. Выделено 43 вида микромицетов из 20 родов, относящихся к 6 семействам и 3 классам, а также стерильный мицелий (табл. 1). Самыми богатыми по числу обнаруженных видов в лесных экосистемах заповедника были представители родов *Penicillium* (11 видов) и *Aspergillus* (7 видов). Такие роды грибов, как *Mucor*, *Trichoderma* и *Fusarium*, были представлены 3–4 видами, а остальные 15 родов – по 1 виду, что составило 75% родового разнообразия выявленной микобиоты.

По современным представлениям сукцессия микромицетов при разложении органической мортмассы в почве протекает в направлении: гидролитики → копиотрофы → олиготрофы [12]. Среди выделенных нами видов микромицетов были все перечисленные экологические группы, отличающиеся по источникам питания и стратегиям роста [13]. Наиболее многочисленны сапротрофные микромицеты, развивающиеся в почве и на растительных остатках. Это, в первую очередь, представители родов *Talaromyces*, *Trichoderma*, *Acremonium* и связанных с ними анаморфных родов *Aspergillus* и *Penicillium*. Значительным числом видов представлены факультативно-фитопатогенные грибы: *Cladosporium*, *Fusarium*, *Rhizoctonia*, *Botrytis*. Многие выделенные виды грибов являются токсигенными, продуцируют микотоксины различного спектра действия.

Класс *Zygomycetes* представлен сапротрофными видами двух родов, относящихся к группе копиотрофов с высокой линейной скоростью роста мицелия. Класс *Ascomycetes* – сапротрофы группы гидролитиков, уступают в скорости линейного роста предыдущей группе. Подавляющая часть выделенных видов микромицетов – это типичные сапротрофы из класса *Deuteromycetes* (несовершенные грибы). В таксономическом списке класс представлен 15 родами и 36 видами. Это сборная группа грибов, различающаяся по экофизиологическим стратегиям. Среди выделенных видов семейства *Moniliaceae* (бесцветный мицелий) есть представители олиготрофной группы с низкой скоростью роста мицелия (*Penicillium tardum*, *P. daleae*, *Paecilomyces lilacinum*, *Acremonium alternatum*, *Cephalosporium acremonium*), предпочитающие микрозоны с малой концентрацией питательных веществ. Из этого же семейства многие виды относятся к типичным гидролитикам: *P. funiculosum*, *P. notatum*, *Aspergillus ustus*, *A. wentii*, *A. niger*, *A. alliaceus*. Многие представители семейств *Dematiaceae* (тёмноцветные гифомицеты)

и *Tuberculariaceae*, а также представители группы *Mycelia sterilia* являются факультативными паразитами растений. Например, обнаруженные нами виды рода *Cladosporium*, вызывают листостебельные болезни растений, а виды рода *Fusarium*, *Rhizoctonia solani* и *Drechslera sorokiniana* входят в комплекс возбудителей корневых гнилей [15]. Указанные виды грибов сохраняются на растительных остатках, обеспечивая инфекционный потенциал почвы. Выявленное распределение видового состава микромицетов характеризует фитосанитарное состояние изученных фитоценозов.

Видовая структура почвообитающих микромицетов исследуемых биотопов заповедника. Нами были выделены в общем комплексе микобиома заповедника 19 типичных видов микромицетов. Зигомицеты представлены одним видом *Rhizopus stolonifer*, сумчатые грибы – видом *Chaetomium piluliferum*. Несовершенные грибы преобладают и представлены 17 видами. Среди представителей данного класса наиболее распространены виды семейства *Moniliaceae*: *Aspergillus* (*A. alliaceus*, *A. candidum*, *A. ustus*, *A. wentii*), *Penicillium* (*P. expansum*, *P. funiculosum*, *P. simplicissimus*, *P. tardum*), *Paecilomyces lilacinum*, *Acremonium alternatum*, *Cephalosporium acremonium*, *Botrytis cinerea*, *Sporotrichum piluliferum*, *Trichoderma koningii*, *Gliocladium virens*. Семейство *Dematiaceae* представлено одним видом *Humicola grisea*. Семейство *Tuberculariaceae* – грибов с многоклеточными конидиями – представлено видом *Fusarium solani*.

По экологической валентности комплекс типичных микромицетов лесных экосистем заповедника включает в себя эвритопные виды: *Penicillium tardum*, *P. expansum*, *P. simplicissimus*, которые встречаются также в лесных почвах Российской Федерации [10, 16], включая Республику Бурятия [17]. К stenotопным видам – индикаторам почв лесостепной зоны относятся *Paecilomyces lilacinum*, *Aspergillus candidum*, *Acremonium alternatum*, *Cephalosporium acremonium*, эти микромицеты являются термофильными и ксерофильными [13, 18].

Состав случайных видов микромицетов в почвах заповедника был достаточно многочисленным (24 вида). Класс *Zygomycetes* представлен тремя видами рода *Mucor*: *M. hiemalis*, *M. michei*, *M. ramosissimus*. Класс *Ascomycetes* – видом *Talaromyces flavus*, который относится к олиготрофам, но обладает высокой устойчивостью в неблагоприятных условиях среды.

Таблица 1 / Table 1

Таксономический состав почвенной микобиоты Воронежского заповедника
Taxonomic composition of the soil mycobiota of the Voronezh Nature Reserve

Класс Class	Семейство Family	Род Genus	Вид Species
Zygomycetes	Mucoraceae	<i>Mucor</i>	<i>hiemalis</i> Wehmer
			<i>miehei</i> Cooney et Emerson
			<i>ramosissimus</i> Samutsevitsch
		<i>Rhizopus</i>	<i>stolonifer</i> (Ehrenb. Ex Link) L.
Ascomycetes	Trichocomataceae	<i>Talaromyces</i>	<i>flavus</i> * (Klocker) Stolk et Sams
	Chaetomiaceae	<i>Chaetomium</i>	<i>piluliferum</i> Daniels
Deuteromycetes	Moniliaceae	<i>Acremonium</i>	<i>alternatum</i> Lk. ex Fries
		<i>Aspergillus</i>	<i>candidus</i> Link
			<i>clavatus</i> * Desmaz.
			<i>alliaceus</i> Thom. et Church.
			<i>niger</i> * V. Tiegh.
			<i>ustus</i> * (Bain) Thom. et Church.
			<i>terreus</i> * Thom.
			<i>wentii</i> * Wehmer
		<i>Botrytis</i>	<i>cinerea</i> * Persoon ex Fries
		<i>Cephalosporium</i>	<i>acremonium</i> Corda
		<i>Gliocladium</i>	<i>virens</i> Miller, Giddens et Fost
		<i>Paecilomyces</i>	<i>lilacinum</i> Thom.
		<i>Penicillium</i>	<i>simplicissimus</i> (Oud.) Thom.
			<i>daleae</i> Zaleski
			<i>restrictum</i> * Gilb. et Abb.
			<i>tardum</i> * Thom.
			<i>canescens</i> Sopp.
			<i>lanosum</i> Westling
			<i>funiculosum</i> * Thom.
			<i>expansum</i> Link.
			<i>rubrum</i> * Stoll.
			<i>janthinellum</i> Biourge
			<i>notatum</i> * West.
		<i>Trichoderma</i>	<i>koningii</i> * Oudem
			<i>viride</i> * Pers.
			<i>harzianum</i> * Rifai
		<i>Sporotrichum</i>	<i>piluliferum</i> Link et Fries
Dematiaceae	<i>Botryotrichum</i>	<i>piluliferum</i> * Sacc. et March.	
	<i>Drechslera</i>	<i>sorokiniana</i> Sacc. Subram	
	<i>Humicola</i>	<i>grisea</i> * Traaen	
	<i>Stachybotrys</i>	<i>chartarum</i> * (Ehrenb.) Hugnes	
	<i>Cladosporium</i>	<i>herbarum</i> (Pers.) Link	
Tuberculariaceae	<i>Fusarium</i>	<i>solani</i> * (Mart) Appl.	
		<i>oxysporum</i> * Snyder et Hans	
		<i>nivale</i> (Fr) Ces.	
		<i>sumbucinum</i> * Fuckel	
Группа Mycelia sterilia		<i>Rhizoctonia</i>	<i>solani</i> * Kuhn.

Примечание: * – токсигенные виды [11].

Note: * – toxicogenic species [11].

Таблица 2 / Table 2

Видовое богатство и разнообразие почвенных микромицетов в лесных экосистемах Воронежского заповедника (средние значения по изученным биотопам)
Species richness and diversity of soil micromycetes in forest ecosystems of the Voronezh Nature Reserve (average values for the studied biotopes)

Показатели / Indicators	Значения / Values
Всего выделенных видов / Total number of species	43
Количество типичных видов / Number of typical species	11
Из них доминантов и часто встречающихся Of these, the dominant and frequent	8
Суммарная плотность типичных видов, % Percentage of typical species, %	50–55
Суммарная плотность случайных видов, % Total density of random species, %	45–50
Индекс разнообразия Шеннона (H) / Shannon diversity index	3,10–3,32
Индекс доминирования Симпсона (C) / Simpson's dominance index	0,09–0,12
Индекс выровненности Пиелу (U) / Pielu alignment index	0,72–0,78

Среди случайных также преобладает класс Deuteromycetes (19 видов). Представители семейства Moniliaceae – виды родов *Aspergillus* (*A. terreus*, *A. clavatus*, *A. niger*), *Penicillium* (*P. daleae*, *P. janthinellum*, *P. notatum*, *P. rubrum*, *P. canescens*, *P. lanosum*, *P. strictum*), *Trichoderma* (*T. viride*, *T. harzianum*). Более разнообразны представители семейства Dematiaceae, они представлены видами из 4 родов – *Cladosporium herbarum*, *Drechslera sorokiniana*, *Botryotrichum piluliferum*, *Stachybotrys chartarum*. Семейство Tuberculariaceae – представлено видами рода *Fusarium* (*F. oxysporum*, *F. submicinum*, *F. nivale*). Наши данные совпадают с результатами других авторов [19, 20] в том, что грибы рода *Fusarium* в основном встречаются в почвах смешанных лесов умеренных климатических зон, покрытых травянистой растительностью, и весьма бедно представлены в почвах хвойных лесов. Среди случайных видов обнаружена *Rhizoctonia solani* – представитель *Mycelia sterilia*.

Видовая структура комплекса типичных видов грибов в лесах заповедника вполне соответствовала установленной для почв и подстилок хвойных и широколиственных лесов умеренной зоны [10, 18, 20]. К доминирующим видам, по результатам исследования, относились *P. tardum* – эвритошный вид и стенотопные виды *Ceph. acremonium* и *Acr. alternatum*. Типичные частые и редкие виды в структуре микобиома преобладают. Так, в ранге часто встречающихся видов обнаружили *P. simplicissimus*, *P. lilacinum*, *P. expansum*, *P. janthinellum*. В исследуемых почвах насыщенность представителями этого рода достигала 30–40%. Подобное распределение по числу видов и частоте встречаемости

рода *Penicillium* отмечали и другие авторы в микромицетных сообществах северных таёжных зон и умеренных широт [20, 21]. Кроме этого, часто встречающимися были выделены виды рода *Aspergillus* (*A. ustus*, *A. wentii*, *A. candidus*), особенно в биотопах серых почв широколиственного леса заповедника. Наши данные согласуются с данными других авторов [17, 21], согласно которым грибы рода *Aspergillus* являются характерными для лесных почв. В ранге типичных частых видов обнаружили и характерные для чернозёмной почвы *Paec. lilacinum*, *H. grisea*, *T. koningii*. В ранге редко встречающихся выделяли *S. piluliferum*, *M. miehei* и отмечали рост фитопатогенных видов *F. oxysporum*, *F. solani*, *Cl. herbarum*, но их суммарная плотность не превышала 20%.

Если рассматривать показатели видового богатства, доминирования и выровненности комплекса микромицетов, то можно сделать выводы о направленности сукцессии в почвах лесной экосистемы заповедника (табл. 2).

В целом, большое количество выделенных видов, высокий индекс (H), который отражает не только видовое разнообразие, но и равномерность представленности этих видов, соответственно высокие значения индекса (U) и низкие значения индекса (C) свидетельствуют о богатстве генофонда микромицетов лесных почв Воронежского заповедника. Примерно равное количество и плотность как типичных, так и случайных видов обеспечивают функциональную стабильность микробного комплекса, что соответствует адаптивной зоне «гомеостаза» [22].

Заключение

Изучено видовое богатство почвенных микроскопических грибов уникального природного комплекса Воронежского заповедника, не подвергавшегося антропогенному воздействию. Впервые выявлено 43 вида микроскопических грибов из 20 родов, относящихся к 6 семействам и 3 классам. Преобладающей являлась группа несовершенных грибов класса Deuteromycetes (36 видов). Отмечено высокое родовое разнообразие грибов при малой видовой насыщенности родов. Семейство Moniliaceae представлено 9 родами, семейство Dematiaceae – 5 родами, а семейство Tuberculariaceae – 1 родом. Большая часть выделенных изолятов отнесена к родам *Penicillium* и *Aspergillus*.

Микобиота лесных почв заповедника представлена не только разными экологическими группами по источникам питания и стратегиям роста, видами характерными для умеренных и северных регионов, но и грибами, приуроченными именно к природно-климатической зоне региона. В составе комплекса грибов преобладают типичные почвенные сапротрофы и значительным числом представлены потенциально патогенные виды. Поэтому знания о видовом составе грибов необходимы для решения вопросов защиты растений.

Изучение микобиоты почв заповедника показало высокое видовое разнообразие микромицетов. Видовая структура комплекса типичных видов грибов в различных биотопах заповедника представлена значительным количеством типичных частых и редких видов. Группу доминантов составили 3 вида микромицетов: *P. tardum*, *C. acremonium*, *Acr. alternatum*. Широкий спектр экофизиологических стратегий выделенных видов микромицетов из лесных почв природного заповедника свидетельствует о сформированных полноценных сукцессиях, которые сбалансировано и активно осуществляют процессы разложения растительных остатков.

Наши данные по разнообразию микромицетов, наряду с аналогичными по другим организмам, можно будет включать в реестр оценки состояния антропогенно-нарушенных экосистем при организации биомониторинга в данной природно-климатической зоне. Незатронутые антропогенным вмешательством лесные почвы Воронежского заповедника можно рассматривать эталонными в качестве регионального фона.

Литература

- Gadd G.M. Geomycology: biogeochemical transformations of rocks, minerals, metals and radionuclides by fungi, bioweathering and bioremediation // *Mycologia*. 2007. V. 111. No. 1. P. 3–49.
- Великанов Л.Л., Успенская Г.Д. Некоторые аспекты экологии грибов: пути формирования основных экологических групп грибов, их место и роль в биогеоценозах // *Итоги науки и техники. Ботаника*. Москва: ВИНТИ. 1980. Т. 4. С. 49–105.
- Dighton J. Nutrient cycling by saprotrophic fungi in terrestrial habitats // *The Mycota I. Environmental and microbial relationships* / Eds. C.P. Kubicek, I.S. Druzhinina. Berlin Heidelberg: Springer-Verlag, 2007. P. 287–300.
- Свистова И.Д., Назаренко Н.Н. Экологический тренд сукцессии микобиома в чернозёме старого ботанического сада // *Теоретическая и прикладная экология*. 2022. № 3. С. 142–148.
- Широких А.А., Колупаев А.В. Грибы в биомониторинге наземных экосистем // *Теоретическая и прикладная экология*. 2009. № 3. С. 4–15.
- Евдокимова Г.А. Почвенная микобиота как фактор устойчивости почв к загрязнению // *Теоретическая и прикладная экология*. 2014. № 2. С. 17–24.
- Gams W. Biodiversity of soil-inhabiting fungi // *Biodiversity and Conservation*. 2007. V. 16. P. 69–72.
- Девятова Т.А., Алаева Л.А., Стародубцева Е.А., Удоденко Ю.Г. Экологические закономерности распространения и морфологические особенности лесных почв надпойменно-террасового типа местности в пределах Воронежского заповедника // *Лесотехнический журнал*. 2019. № 2. С. 22–31.
- Теппер Е.З., Шильникова В.К., Переверзева Г.И. Практикум по микробиологии. М.: Дрофа, 2004. 256 с.
- Мирчинк Т.Г. Почвенная микология. М.: МГУ, 1988. 220 с.
- Билай В.И., Курбацкая З.А. Определитель токсинообразующих микромицетов. Киев: Наукова думка, 1990. 236 с.
- Звягинцев Д.Г. Строение и функционирование комплекса почвенных микроорганизмов // *Структурно-функциональная роль почвы в биосфере*. М.: ГЕОС, 1999. С. 101–112.
- Билай В.И., Элланская И.А., Кириленко Т.С. Микромицеты почвы. Киев: Наукова думка, 1984. 264 с.
- Свистова И.Д., Назаренко Н.Н., Корецкая И.И. Санитарно опасные мицелиальные микроорганизмы в почвах Воронежа // *Гигиена и санитария*. 2016. Т. 95. № 3. С. 247–250.
- David J.C. A contribution to the systematic of Cladosporium: Revision of the fungi previously referred to Heterosporium // *Mycologia*. 1997. V. 172. P. 1–157.
- Алдобаева И.И., Александрова А.В. Почвообитающие грибы Волго-Ахтубинской поймы // *Микология и фитопатология*. 2017. № 6. С. 319–327.

17. Дарханова Т.А., Александрова А.В. Почвенные микромицеты лесных местообитаний Республики Бурятия // Микология и фитопатология. 2010. № 6. С. 507–515.

18. Евсеев В.В. Микромицеты лесных почв и древесно-кустарниковой растительности лесостепной зоны Курганской области // Вестник Курганского государственного университета. Серия: Естественные науки. 2012. № 3. С. 24–29.

19. Шералиев А.Ш. Распространение грибов рода *Fusarium* в почвах Чаткальского горнолесного заповедника // Микробиологический журнал. 2002. № 3. С. 38–41.

20. Кураков А.В., Семенова Т.А. Видовое разнообразие микроскопических грибов в лесных экосистемах южной тайги Европейской части России // Микология и фитопатология. 2016. № 6. С. 367–378.

21. Шумилова Л.П., Павлова Л.М. Видовое разнообразие культивируемых микромицетов в буро-таёжных почвах Северо-Востока Амурской области // Микология и фитопатология. 2020. Т. 54. № 2. С. 124–133.

22. Гузев В.С., Левин С.В., Звягинцев Д.Г. Реакция микробной системы почв на градиент концентрации тяжёлых металлов // Микробиология. 1985. Т. 54. № 3. С. 414–420.

References

1. Gadd G.M. Geomycology: biogeochemical transformations of rocks, minerals, metals and radionuclides by fungi, bioweathering and bioremediation // Mycologia. 2007. V. 111. No. 1. P. 3–49. doi: 10.1016/j.mycres.2006.12.001

2. Velikanov L.L. Some aspects of mushroom ecology: ways of formation of the main ecological groups of fungi, their place and role in biogeocenoses // Itogi nauki i tekhniki. Botanika. Moskva: VINITI, 1980. No. 4. P. 49–105 (in Russian).

3. Dighton J. Nutrient cycling by saprotrophic fungi in terrestrial habitats // The Mycota I. Environmental and microbial relationships / Eds. C.P. Kubicek, I.S. Druzhinina. Berlin Heidelberg: Springer-Verlag, 2007. P. 287–300.

4. Svistova I.D., Nazarenko N.N. Ecological trend of succession in mycobiome of the old botanical garden chernozem // Theoretical and Applied Ecology. 2022. No. 3. P. 142–148 (in Russian). doi: 10.25750/1995-4301-2022-3-142-148

5. Shirokikh A.A., Kolupaev A.V. Fungi in bio-monitoring of terrestrial ecosystems // Theoretical and Applied Ecology. 2009. No. 3. P. 4–15 (in Russian). doi: 10.25750/1995-4301-2009-3-004-014

6. Evdokimova G.A. Soil microbiota as a factor of 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

7. Gams W. Biodiversity of soil-inhabiting fungi // Biodiversity and Conservation. 2007. V. 16. P. 69–72.

8. Devyatova T.A., Alaeva L.A., Starodubtseva E.A., Udodenko Yu.G. Ecological patterns of distribution and morphological features of forest soils of the above-floodplain-terrace type of terrain within the Voronezh Nature Reserve // Lesotekhnicheskiiy zhurnal. 2019. No. 2. P. 22–31 (in Russian). doi: 10.34220/issn.2222-7962/2019.2/3

9. Tepper E.Z., Shilnikova V.K., Pereverzeva G.I. Microbiology Workshop. Moskva: Drofa, 2004. 256 p.

10. Mirchink T.G. Soil mycology. Moskva: MGU, 1988. 220 p. (in Russian).

11. Bilay V.I., Kurbatskaya Z.A. Determinant of toxin-forming micromycetes. Kiev: Naukova dumka, 1990. 236 p. (in Russian).

12. Zvyagintsev D.G. Structure and functioning of the complex of soil microorganisms. Moskva: GEOS, 1999. P. 101–112 (in Russian).

13. Bilay V.I., Ellanskaya I.A., Kirilenko T.S. Soil micromycetes. Kiev: Naukova dumka, 1984. 264 p. (in Russian).

14. Svistova I.D., Nazarenko N.N., Koretskaya I.I. Sanitary dangerous mycelial micro-organisms in the soils of Voronezh // Gigiena i sanitariya. 2016. V. 95. No. 3. P. 247–250. doi: 10.18821/0016-9900-2016-95-3-247-250

15. David J.C. A contribution to the systematic of Cladosporium: Revision of the fungi previously referred to Heterosporium // Mycologia. 1997. V. 172. P. 1–157.

16. Aldobaeva I.I., Aleksandrova A.V. Soil-dwelling fungi of the Volga-Akhtuba floodplain // Mikologiya i fitopatologiya. 2017. V. 6. P. 319–327 (in Russian).

17. Darkhanova T.A., Aleksandrova A.V. Soil micromycetes of forest habitats of the republic of Buryatia // Mikologiya i fitopatologiya. 2010. V. 6. P. 507–515 (in Russian).

18. Evseev V.V. Micromycetes of forest soils and tree-shrub vegetation forest-steppe zone of the Kurgan Region // Vestnik Kurganskogo gosudarstvennogo universiteta. 2012. No. 3. P. 24–29 (in Russian).

19. Sheraliev A.Sh., Bukharov K., Kholmurabov Ch. Distribution of *Fusarium* fungi in the soils of the Chatkal Mountain Forest Reserve // Mikrobiologicheskiiy zhurnal. 2002. No. 3. P. 38–41 (in Russian).

20. Kurakov A.V., Semenova T.A. Species diversity of microscopic fungi in forest ecosystems of the southern taiga of the European part of Russia // Mikologiya i fitopatologiya. 2016. V. 6. P. 367–378 (in Russian).

21. Shumilova L.P., Pavlova L.M. Species diversity of cultivated micromycetes in the brown-taiga soils of the north-east of the amur region // Mikologiya i fitopatologiya. 2020. V. 54. No. 2. P. 124–133 (in Russian). doi: 10.31857/s0026364820020117

22. Guzev V.S., Levin S.V., Zvyagintsev D.G. The response of the microbial system of soil to a heavy metal concentration gradient // Mikrobiologiya. 1985. V. 54. No. 3. P. 414–420 (in Russian).

**Разработка системы экологических индикаторов,
отражающих водохозяйственные аспекты предприятия
в свете устойчивого развития**

© 2023. С. А. Двинских, д. г. н., профессор,
О. В. Ларченко, к. г. н., доцент, М. А. Оскина, аспирант,
Пермский государственный национальный исследовательский университет,
614990, Россия, г. Пермь, ул. Букирева, д. 15,
e-mail: dvins@mail.ru, larhcenko@yandex.ru, sky_mari@mail.ru

Производственная деятельность предприятий в современных условиях оказывает значительное негативное воздействие на состояние окружающей среды, в том числе на водные ресурсы. В последние десятилетия всё чаще дефицит пресной воды повсеместно усиливается и возникает в регионах, где его раньше не было. Причина – расширение водопотребления как населением, так и растущей экономикой. Существует две причины возникновения дефицита воды: уменьшение количества водных ресурсов из-за потребления воды промышленностью, сельским хозяйством и людьми; косвенные потери воды в результате вырубки лесов, осушения водоёмов и болот, а также загрязнение воды, причём оно по результату равнозначно потере запасов пресной воды; загрязнение воды может существенно превосходить объём воды, непосредственно используемой в производстве и быту. Нами предложена методика оценки водного дефицита, основанная на расчёте интегрального индекса водных ресурсов. Он позволяет сделать вывод о вкладе изучаемого предприятия в формирование (или не формирование) водного дефицита территории. Индекс представляет среднегеометрическую величину из двух индикаторов. Индикатор сбросов сточных вод характеризует качество водных ресурсов, а индикатор водопользования – их количество. Предельные значения индикаторов и интегрального индекса равны единице, её превышение свидетельствует о возникновении водного дефицита. Предлагаемая методика использована при оценке возможного возникновения количественного и качественного дефицита водных ресурсов на территории влияния крупного добывающего предприятия, расположенного на северо-востоке Пермского края. Установлено, что для исследуемого региона характерно отсутствие водного дефицита по количеству водных ресурсов даже в экстремально маловодные годы. Удельная водообеспеченность на одного жителя характеризуется как «средняя». Её значение не уменьшится и при планируемом увеличении водозабора на нужды предприятия на период до 2030 г. Однако существует дефицит по качеству водных объектов. Выявлены выпуски сточных вод, для которых характерно превышение индикатора сброса по всем элементам и показателям в течение рассматриваемого периода. Это требует принятия мер по снижению концентраций загрязняющих веществ в сбрасываемых водах. Предлагаемый интегральный показатель может использоваться при планировании деятельности предприятия в свете устойчивого развития.

Ключевые слова: устойчивое развитие, предприятие, водные ресурсы, индикатор, интегральный индекс, водохозяйственный баланс, водообеспеченность, сточные воды, дефицит, качество воды.

**Developing a system of environmental indicators reflecting
the water management aspects of an enterprise in the light
of sustainable development**

© 2023. S. A. Dvinskikh ORCID: 0000-0002-8443-8100
O. V. Larchenko ORCID: 0000-0003-1476-2447
M. A. Oskina ORCID: 0000-0002-7577-5762
Perm State National Research University,
15, Bukireva St., Perm, Russia, 614990,
e-mail: dvins@mail.ru, larhcenko@yandex.ru, sky_mari@mail.ru

The negative consequences of the enterprise production activities in the current conditions have a significant destructive effect on the state of the environment, including water resources. In recent decades, the shortage of fresh water is increasing everywhere and occurs in regions where it has not existed before. The reason is the expansion of water consumption by both the population and the growing economy. There are two reasons for water scarcity. First, the decrease in the amount of water resources due to the consumption of water by industry, agriculture and people; indirect water

losses as a result of deforestation, drainage of reservoirs and swamps. Secondly, water pollution, which is equivalent to the loss of fresh water reserves; in terms of volume, water pollution can significantly exceed the volume of water directly used in production and everyday life. We have proposed a method for assessing the water deficit based on the calculation of the integral index of water resources. It allows us to draw a conclusion about the contribution of the enterprise under study to the formation (or the absence of formation) of the water deficit of the territory. The index is the geometric mean of the two indicators. The wastewater discharge indicator characterizes the quality of water resources, and the water use indicator characterizes their quantity. The limit values of the indicators and the integral index are equal to one, its excess indicates the occurrence of water shortage. The proposed methodology was used in assessing the possible occurrence of a quantitative and qualitative shortage of water resources in the territory of influence of a large mining enterprise located in the northeast of the Perm Krai. It has been established that the region under study is characterized by the absence of a water deficit in terms of the number of water resources even in extremely dry years. Specific water supply per 1 inhabitant is characterized as "average". Its value will not decrease even with the planned increase in water intake for the needs of the enterprise for the period up to 2030. However, there is a shortage in the quality of water bodies. We've identified the wastewater outlets, which are characterized by an excess of the discharge indicator for all elements during the period under review. This requires taking measures to reduce the concentrations of pollutants in the discharged waters. The proposed integral indicator can be used when planning the activities of an enterprise in the light of sustainable development.

Keywords: sustainable development, enterprise, water resources, indicator, integral index, water management balance, water supply, wastewater, scarcity, water quality.

В настоящее время активно разрабатываются критерии и индикаторы устойчивого развития. Объясняется это тем, что, по мнению руководителей компаний – участников Глобального договора ООН, ключевым фактором успешного бизнеса на сегодняшний день является концепция устойчивого развития (УР), которая нередко именуется «всемирной моделью будущего цивилизации» [1, 2]. Этому вопросу посвящено большое количество работ. Наиболее известными являются индекс экологической устойчивости (Environmental Sustainability Index), разработанный учёными Колумбийского и Йельского университетов [3]; агрегированный индекс «живой планеты» (ИЖП) (Living Planet Index) [4]; показатель «экологический след» (ЭС) (the Ecological Footprint) [5]; система интегрированных экологических и экономических национальных счетов (a System for Integrated Environmental and Economic Accounting), предложенная Статистическим отделом ООН [6].

В России также существует ряд проектов, посвящённых индикаторам устойчивого развития. Это проекты Всемирного Банка и Минэкономразвития Российской Федерации (РФ) «Учёт экологического фактора в системе индикаторов социально-экономического развития» (2001); доклад «Национальная оценка прогресса при переходе Российской Федерации к устойчивому развитию» (2002) и др. Очень интересный опыт по разработке индикаторов устойчивого развития в 2002–2007 гг. накоплен в Томской, Воронежской, Кемеровской и Самарской областях, г. Москве, Чувашской Республике [2, 7, 8].

Несмотря на большое количество разных систем экологических индексов и индикаторов, разработанных на глобальном уровне [9]

и в РФ [2, 10], единого определения индикатора не существует. Используемые показатели, как правило, дают характеристику блоков (индексов) УР (социальный, экономический, экологический) и их частей (индикаторов), а не низшей ступени составляющих на уровне отдельного предприятия. Нами предложен подход к оценке показателей, характеризующих влияние промышленного предприятия на водные ресурсы с позиции УР (формирования наличия или отсутствия водного дефицита) [11].

Согласно [12], «индикатор устойчивого развития – это показатель, позволяющий судить о состоянии или изменении экономических, социальных или экологических переменных». В данном исследовании под индикатором понимаем показатель, позволяющий судить о состоянии или изменении характеристик экологической составляющей (количество и качество водных ресурсов) УР предприятия [13, 14].

В 2016 г. Генеральная Ассамблея ООН провозгласила период 2018–2028 гг. Международным десятилетием действий «Вода для устойчивого развития». Это объясняется постоянно усиливающимся дефицитом пресной воды. Можно выделить две причины его возникновения. Во-первых, это уменьшение количества водных ресурсов из-за растущего потребления воды и косвенных потерь в результате вырубки лесов и осушения болот. Во-вторых, это загрязнение воды, которое по объёмам может существенно превосходить объём воды, используемой в производстве и быту. Это более опасный и менее контролируемый процесс, чем её прямое использование [15].

Используемые для водных ресурсов индикаторы должны отвечать ряду требований, среди которых: релевантность, то есть соот-

ветствие задачам, которые призван решать определённый показатель; доступность для восприятия; обоснованность и лёгкость интерпретации; пространственно-временная изменчивость; достоверность (индикаторы должны быть основаны на реальных фактах) [14].

Для эффективного управления состоянием всей системы необходимы не только отдельные показатели, но и оценки взаимных связей между ними. Роль таких оценок выполняют интегральные показатели, содержащие обобщающие характеристики состояния всей системы – индексы. Основной целью введения индексов является оценка ситуации или события для прогноза и разработки решений существующих проблем [13]. Из этого следует, что индексы можно использовать для характеристики водопотребления в пределах любой изучаемой территории (в том числе и территории деятельности любого предприятия), с их помощью можно давать как количественную, так и качественную оценку водных ресурсов, что является необходимой основой для прогноза.

В связи с этим цель исследований – оценка возможности возникновения дефицита водных ресурсов на территории влияния крупного добывающего предприятия с использованием разработанных индикаторов.

Объекты и методы исследования

Природной единицей с точки зрения управления водными ресурсами является речной водосбор, в пределах которого формируются водные ресурсы. При расчёте водного дефицита водосбора (территории) следует учитывать суммарное водопотребление всех предприятий, находящихся в его пределах, а затем судить о вкладе изучаемого предприятия в формирование (или не формирование) водного дефицита территории [11, 14]. Мы исходим из того, что, если объём стока, формирующийся в пределах изучаемого водосбора (W), полностью тратится на хозяйственные и промышленные нужды (R), то имеется напряжённая ситуация, близкая к вододефициту:

$$W = R_1 + R_2, \quad (1)$$

где W – объём водных ресурсов, формирующихся в течение одного маловодного года в пределах изучаемого водосбора; R_1 – объём водных ресурсов, потребляемых расчётным предприятием, R_2 – объём водных ресурсов, потребляемых остальными предприятиями

в пределах водосбора. Естественно, если большая часть водных ресурсов потребляется изучаемым предприятием (R_1), то последнее является причиной водного дефицита. О его вкладе в формирование (или не формирование) водного дефицита позволяет судить индикатор водопользования ($I_{\text{вод}}$):

$$I_{\text{вод}} = \frac{R_1}{W - R_2}. \quad (2)$$

При $I_{\text{вод}} = 1$ наблюдается кризисное состояние, водный дефицит, обусловленный изучаемым предприятием.

Состояние водных ресурсов зависит не только от количества забираемой предприятием воды, но и от сбросов сточных вод. Поэтому представляется более наглядным использовать в качестве индикатора показатель «объём сброса загрязнённых сточных вод в поверхностные водоёмы» – $I_{\text{сбр}}$ (м^3):

$$I_{\text{сбр}} = \frac{C_{\text{фсбр}}}{C_{\text{нсбр}}}, \quad (3)$$

где $C_{\text{фсбр}}$ – фактический объём сбрасываемых предприятием сточных вод, м^3 ; $C_{\text{нсбр}}$ – нормативное количество объёмов сбросов сточных вод, м^3 .

Если же нужно учитывать не только объём сбрасываемых сточных вод, но и содержание в них загрязняющих веществ, то предлагаем использовать в качестве индикатора показатель «сброса загрязнённых сточных вод в поверхностные водоёмы» – $I_{\text{сбri}}$:

$$I_{\text{сбri}} = \frac{C_{\text{фи}}}{C_{\text{ни}}} \quad \text{или} \quad I_{\text{сбri}} = \sum \frac{C_{\text{фи}}}{C_{\text{ни}}}, \quad (4)$$

где $C_{\text{фи}}$ – фактическое количество сбрасываемых предприятием i -загрязняющих веществ, мг/л или т/год . Эти данные приводятся по каждому загрязняющему (нормируемому) веществу в соответствии с программой экологического мониторинга предприятия; $C_{\text{ни}}$ – нормативное количество сбросов загрязняющих веществ предприятием в водные объекты (согласно НДС), мг/л или т/год . Оно определяется в соответствии с методикой разработки НДС веществ и микроорганизмов в водные объекты для водопользователей. При $C_{\text{ф}} = C_{\text{н}}$ величина $I_{\text{сбр}} = 1$, это допустимый предел значения индикатора.

Комплексная характеристика состояния водных ресурсов может быть дана на основе интегрального индекса I как среднегеометрической величины из индикаторов количества и качества водных ресурсов:

$$I = \sqrt{I_{\text{сбр}} \cdot I_{\text{вод}}}. \quad (5)$$

На основе предложенной методики проведён анализ возможного возникновения количественного и качественного дефицита водных ресурсов на территории влияния крупного добывающего предприятия (далее – предприятия), расположенного на северо-востоке Пермского края.

Результаты и обсуждение

Как отмечалось выше, водный дефицит можно охарактеризовать двумя группами показателей: количественными и качественными. Количественные показатели включают в себя: объём речного стока (природная составляющая) и объёмы забора и сброса использованной воды (техногенная составляющая), качественные – объём поступления загрязнённых сточных вод и загрязнение водных объектов.

При оценке количественного дефицита водных ресурсов нужно исходить из наилучших условий формирования поверхностного стока и опираться на водохозяйственный баланс предприятий, находящихся в пределах водосбора:

$$W - R = \Delta W \text{ или } W - (R_1 + R_2) = \Delta W, \quad (6)$$

где W – суммарная приходная часть баланса, R – суммарная расходная часть баланса, включающая объём водных ресурсов, потребляемых расчётным предприятием R_1 и объём водных ресурсов, потребляемых остальными предприятиями в пределах водосбора R_2 ; ΔW – результирующая баланса.

Исходными материалами для расчёта приходной составляющей баланса послужили данные многолетних наблюдений на

водомерных постах Уральского УГМС Росгидромета. Расчёты выполняли в соответствии с СП 33-101-2003. В качестве расчётной характеристики выбран минимальный модуль годового стока 95% обеспеченности. Средняя погрешность определения характеристик стока не превышает 10%, что соответствует требованиям СП 33-101-2003.

Исходными материалами для расчёта расходной составляющей водохозяйственного баланса послужили данные по форме федерального статистического наблюдения 2-ТП (Водхоз): «Сведения об использовании воды» за период 2016–2020 гг.

Как отмечено выше, о вкладе изучаемого предприятия в формирование (или не формирование) водного дефицита территории позволяет судить индикатор водопользования $I_{\text{вод}}$. Чем его величина меньше, тем вероятность водного дефицита меньше. Критическое значение индикатора равно единице. В этом случае будет наблюдаться водный дефицит, обусловленный изучаемым предприятием. Результаты расчёта $I_{\text{вод}}$ приведены в таблице 1. Расчёты показали, что индикатор водопользования даже для условий маловодного года намного меньше единицы, что свидетельствует о том, что деятельность предприятия не способствует возникновению водного дефицита.

Для анализа изменчивости характеристик стока построены хронологические графики средних годовых расходов воды по постам, проведены линии трендов расчётных характеристик. Их анализ показал, что для горной полосы изучаемой территории следует ожидать увеличения средних годовых расходов на 1–2% каждые 10 лет, для равнинной части – на 3–4% за каждые 10 лет. Следовательно, можно ожидать, что объёмы водных ресур-

Таблица 1 / Table 1

Результаты расчёта индикатора водопользования $I_{\text{вод}}$
Results of calculating the water use indicator

Год Year	Объём водных ресурсов, тыс. м ³ Volume of water resources, thousand cubic meters			Индикатор водопользования Water use indicator $I_{\text{вод}} = \frac{R_1}{W - R_2}$
	формирующихся в течение маловодного года 95% обесп. formed during a dry year 95% of supply W	потребляемых предприятием consumed by the settlement Enterprise R_1	потребляемых остальными предприятиями consumed by the rest of the enterprises R_2	
2016	2424474,3	6948,89	125289,79	0,003
2017		6758,14	114876,2	0,003
2018		18348,88	110016,3	0,008
2019		16341,18	108935,4	0,007
2020		17889,52	115419,6	0,007

сов (средний годовой, минимальный зимний и летне-осенний меженные), формирующиеся в пределах изучаемой территории, каждые 10 лет будут расти. Таким образом, даже при условии сохранения объёма забора воды, равному забираемому в настоящее время предприятием для своих нужд, дефицита водных ресурсов не будет (при условии, что остальные потребители резко не увеличат объём водозабора). Это подтверждается обеспеченностью населения водными ресурсами.

Оставшийся объём воды после забора водных ресурсов на нужды предприятий используется населением. Удовлетворяет ли он нормативам водопотребления? Для ответа на этот вопрос определена удельная водообеспеченность (табл. 2).

По данным ООН критический уровень удельной водообеспеченности составляет 1,7 тыс. м³/год на человека при средне-многолетнем показателе 7,4 тыс. м³/год на 1 человека. Для сравнения: удельная водообеспеченность за счёт стока местного формирования для Пермского края на конец 2010-х гг. составляла 18,9 тыс. м³/год на 1 человека; для Приволжского федерального округа эта величина значительно меньше – 5,5–11,0 тыс. м³/год на 1 человека.

Расчёты показали, что даже в период экстремальной маловодности изучаемая территория по величине удельной водообеспеченности относится к категории «средняя». Регион расположения предприятия обеспечен водой в достаточном количестве. Если учесть прогноз уменьшения численности населения изучаемой территории почти на 7% к 2025 г., то можно говорить о тенденции к увеличению величины удельной водообеспеченности.

Второй характеристикой водного дефицита является индикатор сброса загрязнённых сточных вод, характеризующий качество воды – $I_{сбр}$ (уравнения 3, 4). Расчёт индикатора $I_{сбр}$ производился по фактическому количеству сбрасываемых предприятием загрязняющих веществ: SO_4^{2-} , Cl^- , K^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ , NO_2^- , NO_3^- , NH_4^+ , взвешенные вещества, нефтепродукты, сухой остаток, БПК₅, ХПК, СПАВ. Для расчёта использованы данные концентраций (т/год и мг/дм³) в контрольных створах, расположенных на расстоянии 500 м ниже по течению от места сброса сточных вод по каждому из шести выпусков предприятия за период с 2016 по 2020 гг. Пятилетний период обусловлен требованием Приказа Министерства природных ресурсов России от 17 декабря 2007 года № 333 «Методика разработки нормативов допустимых сбросов веществ и микроорганизмов в водные объекты для водопользователей», который гласит, что для расчёта нормативов допустимых сбросов необходим ряд наблюдений не менее 5 лет безаварийной работы предприятия. Пример расчёта по одному из выпусков сточных вод приведён в таблице 3.

Расчёты показали, что по некоторым выпускам наблюдается значительное превышение индикатора сброса практически по всем контролируемым элементам. Их максимальные значения изменялись с 2016 по 2020 гг. с 102,0 до 600,0. Средние показатели индикатора сброса за этот же период варьировали в пределах от 4,71 до 12,90 (табл. 4). Таким образом, выявлены выпуски с наиболее высокой экологической нагрузкой, которые требуют принятия мер к снижению концентраций загрязняющих веществ и качеству сбрасываемых вод. К компонентам химического состава, концентрации которых в водных объектах

Таблица 2 / Table 2

Расчёт удельной водообеспеченности для условий маловодного года 95% обеспеченности
Calculation of specific water availability for dry year conditions (95% probability of exceeding)

Год Year	Количество жителей, потребляющих воду из рек изучаемого водосбора, чел. The number of inhabitants consuming water from the rivers of the studied catchment area, people	Объём воды, который может быть потрачен на нужды населения, тыс. м ³ The volume of water which can be spent on the needs of the population, thousand cubic meters	Удельная водообеспеченность, тыс. м ³ /год на 1 чел. Specific water supply, thousand cubic meters/year per person
2016	271411	2449001,6	9,02
2017	270296	2452049,9	9,07
2018	265974	2438859,2	9,17
2019	264618	2448417,7	9,25
2020	261675	2436095,1	9,31

Таблица 3 / Table 3

Расчёт индикатора сброса $I_{сбр_i}$ выпуска вод в р. Лёнва за 2020 г.
Calculation of the discharge indicator of release in the Lenva for 2020

Наименование вещества Name of substance	Нормативное количество сбрасываемых загрязняющих веществ Standard amount of discharged pollutants		Фактическое количество сбрасываемых загрязняющих веществ Actual amount of discharged pollutants		Индикатор сброса Discharge indicator	
	мг/дм ³ mg/dm ³	т/год tons/year	мг/дм ³ mg/dm ³	т/год tons/year	мг/дм ³ mg/dm ³	т/год tons/year
Нефтепродукты Petroleum products	0,032	0,014	0,034	0,002	1,06	0,14
SO ₄ ²⁻	100,0	44,28	71,0	6,30	0,71	0,14
Cl ⁻	300,0	132,82	490,0	32,86	1,63	0,25
K ⁺	50,0	22,14	140,0	2,17	2,80	0,10
Ca ²⁺	180,0	79,70	101,0	10,84	0,56	0,14
Mg ²⁺	40,0	17,71	26,0	1,81	0,65	0,10
Na ⁺	120,0	53,13	189,0	13,25	1,58	0,25

Примечание: жирным шрифтом выделено превышение критического значения.
Note: the excess of the critical value is highlighted in bold.

Таблица 4 / Table 4

Значения максимального и среднего индикатора сброса по годам
Values of the maximum and average discharge indicator by years

Год Year	Значение $I_{сбр}$ Indicator value	Выпуск сточных вод / Waste water outlet					
		№ 1	№ 2	№ 3	№ 4	№ 5	№ 6
2016	среднее / average	1,24	0,90	7,64	21,40	0,70	0,71
	макс / maximum	6,95	1,93	22,94	125,87	1,29	1,27
2017	среднее / average	1,21	0,89	1,54	19,15	0,62	0,80
	макс / maximum	3,50	3,62	3,81	102,03	1,20	2,00
2018	среднее / average	2,02	1,57	2,30	82,42	0,67	0,80
	макс / maximum	6,07	3,64	6,72	436,36	1,60	2,03
2019	среднее / average	2,37	10,30	1,12	38,06	0,89	0,72
	макс / maximum	12,67	81,58	2,90	208,33	3,97	2,15
2020	среднее / average	0,66	1,84	1,15	74,90	0,57	0,86
	макс / maximum	3,77	5,60	2,80	600,00	2,05	2,43
2016–2020	среднее / average	1,38	2,74	1,8	25,45	0,80	0,65
	макс / maximum	12,67	81,58	22,94	600,00	13,05	3,56

региона расположения предприятия требуют пристального внимания, можно отнести взвешенные вещества, сухой остаток, ионы калия, натрия, хлорид-ионы, нефтепродукты.

Для эффективного управления состоянием всей системы необходимы не только отдельные показатели, но и оценки взаимных связей между ними. Роль таких оценок выполняют интегральные показатели. Расчёт интегрального индекса состояния водных ресурсов территории расположения предприятия проводился по формуле (5), как среднегеометри-

ческой величины из индикаторов количества и качества водных ресурсов. Анализ полученных результатов позволил сделать следующие выводы. Дефицит водных ресурсов регион расположения предприятия испытал в 2018–2020 гг., когда величина $I_{макс}$ изменялась в пределах 1,87–2,05 соответственно. По максимальному значению индекса выделена территория, прилегающая к выпускам сточных вод в бассейн р. Лёнва, где на сегодняшний день сохраняется вододефицит по качеству поверхностных водных объектов. Прогнозируемые интеграль-

ные индексы до 2030 г. при существующих объемах производства и водопотребления, очистки сточных вод предприятия, останутся на том же уровне.

Заключение

Разработанная методика оценки водного дефицита опробована на примере одного из предприятий Пермского края. Установлено, что для региона расположения предприятия характерно отсутствие водного дефицита по количеству водных ресурсов даже в мало-водные годы (обеспеченностью 95%). Удельная водообеспеченность на 1 жителя характеризуется как «средняя». Её значение не уменьшится и при планируемом увеличении водозабора на нужды предприятия на период до 2030 г. Однако существует дефицит по качеству водных объектов. Наиболее высокую экологическую нагрузку несут выпуски сточных вод в р. Лёнва. Вещества и ионы, концентрации которых в водных объектах региона расположения предприятия требуют пристального внимания, – ионы аммония, взвешенные вещества, сухой остаток, ионы калия, натрия, хлорид-ионы, нефтепродукты. Интегральный индекс свидетельствует о наличии водного дефицита в регионе расположения предприятия, который не является постоянным, а изменяется во времени и пространстве, что не удовлетворяет требованиям устойчивого развития.

Литература

1. Белоусова А.П., Семашко Л.Ю. Экологические аспекты устойчивого развития и индикаторы, его характеризующие // Проблемы окружающей среды и природных ресурсов. Вып. 1. М.: ВИНТИ, 2004. С. 2–20.
2. Бобылев С.Н. Индикаторы устойчивого развития: региональное измерение. Пособие по региональной экологической политике. М.: Акрополь, ЦЭПР, 2007. 60 с.
3. Expanding the measure of wealth: indicators of environmentally sustainable development. Series No. 17. Environmentally Sustainable Development Studies and Monographs. Washington, D.C.: The World Bank, 1997. 110 p.
4. Indicators for the integration of environmental concerns to transport policies. Working Group on the State of the Environment. Paris: OECD, 1999. ENV/EPOC/SE(98)1/FINAL. 71 p.
5. Indicators of sustainable development: framework and methodologies. New York: United Nation Commission on Sustainable Development, 2001. Background Paper No. 3. 294 p.
6. World Development Indicators 2001. World Bank eLibrary [Internet resource] [https://elibrary.](https://elibrary.worldbank.org)

[worldbank.org](https://elibrary.worldbank.org) (Accessed: 27.04.2021). doi: 10.1596/0-8213-4898-1

7. Минкина А.В., Двинских С.А., Зуева Т.В. Подход к разработке интегрального индекса экологического благополучия территории // Теоретическая и прикладная экология. 2022. № 3. С. 235–240.
8. Садов А.В., Наполов О.Б. Роль и значение природно-ресурсного потенциала при разработке эколого-сбалансированного развития региона // Теоретическая и прикладная экология. 2011. № 2. С. 21–27.
9. Integrated environmental and economic accounting an operational manual: handbook of national accounting. New York: United Nations, 2000. Series F. No. 78. 244 p.
10. Международное десятилетие действий «Вода для устойчивого развития», 2018–2028 годы [Электронный ресурс] https://www.un.org/ru/events/water_decade (Дата обращения: 27.04.2021).
11. Dvinskikh S.A., Larchenko O.V., Oskina M.A. Assessing the sustainable development of an enterprise from the water use standpoint // Modern problems of reservoirs and their catchments. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 2021. V. 834. Article No. 012052.
12. Тарасова Н.П., Кручина Е.Б. Индексы и индикаторы устойчивого развития // Устойчивое развитие: природа-общество-человек. Москва: Издательский центр РХТУ им. Д.И. Менделеева, 2006. Том II. С. 127–144.
13. CAWATERinfo [Электронный ресурс] <http://www.cawater-info.net> (Дата обращения: 27.04.2021).
14. Двинских С.А., Ларченко О.В., Оськина М.А. Обоснование выбора системы экологических индикаторов, отражающих водохозяйственные аспекты промышленного предприятия в свете устойчивого развития // Технологии переработки отходов с получением новой продукции. Киров: ВятГУ, 2021. С. 187–191.
15. Данилов-Данильян В.И. Глобальная проблема дефицита пресной воды // Век глобализации. 2008. № 1. С. 45–56.

References

1. Belousova A.P., Semashko L.Yu. Environmental aspects of sustainable development and indicators that characterize it // Problems of the environment and natural resources. V. 1. Moskva: VINITI, 2004. P. 2–20 (in Russian).
2. Bobilev S.N. Sustainable development indicators: Regional dimension. A guide to regional environmental policy. Moskva: Akropol, CEMS, 2007. 60 p. (in Russian).
3. Expanding the measure of wealth: indicators of environmentally sustainable development. Series No. 17. Environmentally Sustainable Development Studies and Monographs. Washington, D.C.: The World Bank, 1997. 110 p.
4. Indicators for the integration of environmental concerns to transport policies. Working Group

on the State of the Environment. Paris: OECD, 1999. ENV/EPOC/SE(98)1/FINAL. 71 p.

5. Indicators of sustainable development: framework and methodologies. New York: United Nation Commission on Sustainable Development, 2001. Background Paper No. 3. 294 p.

6. World Development Indicators 2001. World Bank eLibrary [Internet resource] <https://elibrary.worldbank.org> (Accessed: 27.04.2021). doi: 10.1596/0-8213-4898-1

7. 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

8. Sadov A.V., Napolov O.B. Role and meaning of natural resources at working out ecologically balanced development of the region // Theoretical and Applied Ecology. 2011. No. 2. P. 21–27 (in Russian). doi: 10.25750/1995-4301-2011-2-021-027

9. Integrated environmental and economic accounting an operational manual: handbook of national accounting. New York: United Nations, 2000. Series F. No. 78. 244 p.

10. International Decade for Action “Water for Sustainable Development”, 2018–2028 [Internet resource]

<https://www.un.org/ru/events/waterdecade> (Accessed: 27.04.2021).

11. Dvinskikh S.A., Larchenko O.V., Oskina M.A. Assessing the sustainable development of an enterprise from the water use standpoint // Modern problems of reservoirs and their catchments. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 2021. V. 834. Article No. 012052. doi: 10.1088/1755-1315/834/1/012052

12. Tarasova N.P., Kruchina E.B. Indices and indicators of sustainable development // Ustoychivoe razvitie: priroda-obshchestvo-chelovek. Moskva: Izdatelskiy tsentr RKhTU im. D.I. Mendeleeva, 2006. V. II. P. 127–144 (in Russian).

13. CAWATERinfo [Internet resource] <http://www.cawater-info.net> (Accessed: 27.04.2021).

14. Dvinskikh S.A., Larchenko O.V., Oskina M.A. Justification for the choice of a system of environmental indicators that reflect the water management aspects of an industrial enterprise in the light of sustainable development // Tekhnologii pererabotki otkhodov s polucheniym novoy produktsii. Kirov: VyatSU, 2021. P. 187–191 (in Russian).

15. Danilov-Danilyan V.I. The global problem of fresh water shortage // Vek globalizatsii. 2008. No. 1. P. 45–56 (in Russian).

Извлечение ионов меди и цинка из сточных вод сорбентом на основе хитозана

© 2023. Е. А. Татаринцева^{1,2}, к. т. н., доцент,
О. А. Арефьева¹, к. б. н., доцент, Л. Н. Ольшанская¹, д. х. н., профессор,
А. А. Петров¹, магистрант, Ф. Бугерара¹, аспирант,

¹Саратовский государственный технический университет
имени Гагарина Ю. А.,

410054, Россия, г. Саратов, ул. Политехническая, д. 77,

²Тольяттинский государственный университет,

445020, Россия, г. Тольятти, ул. Белорусская, д. 14,

e-mail: tatarinceva-elen@mail.ru, oarefeva@inbox.ru, ecos123@mail.ru

Целью данной работы явилось получение сорбционных магнитных материалов на основе ферритизированного гальваношлама, терморасширенного оксида графена и хитозана для удаления из водных сред ионов тяжёлых металлов (Cu^{2+} , Zn^{2+}). Рассмотрены методы формирования магнитного композиционного сорбента путём введения ферритизированного гальваношлама одновременно с терморасширенным оксидом графена. Дана характеристика состава полученного сорбционного материала с помощью метода ИК-спектроскопии. Определены функциональные группы (первичные амино- и гидроксогруппы), которые способны к координации с различными ионами металлов или к участию в ионном обмене. Исследования сорбции по отношению к ионам цинка и меди (II) проводили в статических условиях при их извлечении из модельных растворов сточных вод. Максимальная сорбционная ёмкость сорбента по отношению к ионам Cu^{2+} составила $6,9 \pm 0,1$ ммоль/г, к ионам Zn^{2+} – $2,6 \pm 0,1$ ммоль/г сорбента.

Ключевые слова: сорбенты, очистка воды, ионы тяжёлых металлов, оксид графена, магнитосорбенты, отходы промышленности.

Extraction of copper and zinc ions from wastewater by a sorbent based on chitosan

© 2023. E. A. Tatarintseva^{1,2} ORCID: 0000-0002-5925-3227*
O. A. Arefieva¹ ORCID: 0000-0002-2835-8595* L. N. Olshanskaya¹ ORCID: 0000-0002-8449-9368*

A. A. Petrov¹ ORCID: 0000-0002-4098-2243* F. Bugerara¹ ORCID: 0000-0003-1992-0723*

¹Yuri Gagarin State Technical University of Saratov,
77, Politekhnikeskaya St., Saratov, Russia, 410054,

²Togliatti State University,

14, Belorusskaya St., Togliatti, Russia, 445020,

e-mail: tatarinceva-elen@mail.ru, oarefeva@inbox.ru, ecos123@mail.ru

The aim of this work was to obtain sorption magnetic materials based on ferritized galvanic sludge, thermally expanded graphene oxide, and chitosan for the removal of heavy metal ions (Cu^{2+} , Zn^{2+}) from aqueous media. Thermally expanded graphene oxide was obtained by electrochemical oxidation of graphite followed by hydrolysis and heat treatment at 900 °C. Ferritized iron-containing galvanic sludge was obtained by deposition by successive acid-base treatment from an aqueous suspension of galvanic sludge followed by heat treatment at 900 °C for 1.5 h. Methods for forming a magnetic composite sorbent by introducing ferritized galvanic sludge simultaneously with thermally expanded graphene oxide are considered. The resulting sorbent has the form of grains with a particle size of 2–3 mm, which have magnetic properties (≈ 0.02 T). The composition of the resulting sorption material is characterized using the IR spectroscopy method. Functional groups (primary amino and hydroxyl groups), that are capable of coordinating with various metal ions or participating in ion exchange have been determined. Studies of sorption with respect to zinc and copper(II) ions were carried out under static conditions during their extraction from model wastewater solutions. The maximum sorption capacity of the sorbent for Cu^{2+} ions was 6.9 ± 0.1 mmol/g, for Zn^{2+} ions – 2.6 ± 0.01 mmol/g. Sorption isotherms of Cu^{2+} and Zn^{2+} ions by the developed sorption material belong to type I according to the IUPAC classification, which is compiled on the basis of the classical classification of adsorption–desorption isotherms of Brunauer, Deming, Deming and Teller (BDDT classification), this type is typical for adsorption with the formation of a monolayer on a porous solid body.

Keywords: sorbents, water purification, heavy metal ions, graphene oxide, magnetosorbents, industrial waste.

Для минимизации отрицательного воздействия тяжёлых металлов на окружающую среду в России и за рубежом используются разнообразные методы очистки сточных вод (СВ). Большинство из них являются дорогостоящими и сложными в исполнении. Поэтому актуален поиск и разработка методов, позволяющих извлекать экотоксиканты без дополнительной техногенной нагрузки на окружающую среду. Для снижения высокотоксичных концентраций рекомендуется использовать эффективные адсорбционные методы очистки. Перспективные и экономически выгодные адсорбенты можно изготавливать из вторичного сырья, что позволит одновременно решить сразу две проблемы: очистку воды и утилизацию отходов [1–4]. Однако применение исходных материалов в качестве адсорбентов малоэффективно и технически сложно, поэтому работы, направленные на создание новых, дешёвых, обладающих высокой адсорбционной ёмкостью, материалов при модификации отходов, весьма актуальны и имеют большое научное и практическое значение.

Проведённый анализ научно-технической и патентной литературы позволил установить, что имеется достаточное количество информации о возможности использования хитозана в качестве сорбционного материала, благодаря таким его качествам, как хорошая сорбционная ёмкость по отношению к ионам тяжёлых металлов [5, 6] и высокие флокуляционные свойства [7]. Хитозан имеет ряд ценных свойств: плохо растворяется в воде, легко поддается химической и физической модификации [8], растворяется в мало концентрированных органических кислотах, что делает его перспективным биополимером для использования в качестве связующего при получении органоминеральных композиционных сорбентов.

Целью настоящей работы явилась разработка способа получения сорбционного материала на основе терморасширенного оксида графена и ферритизированного железосодер-

жащего гальваношлама, иммобилизованных в хитозановую матрицу, и исследование адсорбционных свойств сорбента по отношению к ионам меди и цинка при извлечении их из модельных растворов.

Объекты и методы исследования

В данной работе в качестве наполнителей для полимерной матрицы хитозана использовали ферритизированный гальваношлам (ФГШ) и терморасширенный оксид графена (ОГ). Добавление наполнителей позволяет улучшить не только механические и сорбционные свойства, но и придать сорбционному материалу магнитные свойства, что облегчает извлечение материала из различных сред (вода, почва) после сорбции. Терморасширенный оксид графена получали методом электрохимического окисления графита с последующими гидролизом и термической обработкой при 900 °С. Ферритизированный железосодержащий гальваношлам получали методом осаждения при последовательной кислотно-щелочной обработке из водной суспензии гальваношлама с последующей термообработкой при 900 °С в течение 1,5 ч.

В качестве связующего использовали хитозан, обладающий высокими хемосорбционными свойствами по отношению к ионам тяжёлых металлов [9].

Физико-химические свойства хитозана позволяют использовать его для очистки воды. Использование хитозана в качестве сорбента экономически нецелесообразно ввиду его высокой стоимости, поэтому получение композиционных материалов на его основе, ферритизированного гальваношлама и оксида графена, является актуальным и имеет практическое значение.

Введение ОГ в состав сорбента проводили с целью увеличения удельной поверхности материала и повышения эффективности очистки от ионов тяжёлых металлов, так как все ком-

Таблица / Table
Свойства исходного (ГШ_{исх}) и ферритизированного гальваношлама (ФГШ)
Properties of the original (GS_{or}) and ferritized galvanic sludge (FGS)

Свойства / Properties	ГШ _{исх} / GS _{or}	ФГШ / FGS
Истинная плотность, г/см ³ / True density, g/cm ³	4,0±0,4	5,0±0,5
Насыпная плотность, г/см ³ / Bulk density, g/cm ³	1,6±0,1	2,0±0,1
Удельная поверхность, см ² /г / Specific surface, cm ² /g	–	1805±180
pH	6,5±0,5	5,0±0,5
Класс опасности / Hazard Class	3	4

поненты в отдельности являются их хорошими поглотителями.

С помощью ИК-Фурье-спектрометра ФСМ 1201 снимали ИК-спектры полученного сорбента для установления в его составе функциональных групп.

Полученный сорбционный материал использовали для очистки модельных СВ от Cu^{2+} и Zn^{2+} в статическом режиме. Изотермы сорбции ионов определяли в интервале исходных концентраций (C_0) до 0,5–5 мг/дм³. Такие малые концентрации ионов тяжёлых металлов характерны для сточных вод, подвергшихся реагентной очистке. Для получения изотерм сорбции навески сорбента массой (m) 0,5 г заливали 50 мл раствора (V) с различной начальной концентрацией (C_0) адсорбатов. При достижении сорбционного равновесия через сутки раствор отделяли от сорбента центрифугированием при 10000 об./мин и определяли равновесные концентрации адсорбатов (C_p). Значение pH раствора составляло $6,5 \pm 0,2$ при постоянном перемешивании и термостатировании в интервале температур $293 \pm 0,2$ К на водяной бане со встряхивателем Julabo SW23. Равновесную концентрацию ионов тяжёлых металлов (Cu^{2+} , Zn^{2+}) оценивали методом инверсионной вольтамперометрии на анализаторе ТА-4. Погрешность методики измерения составляет $\leq 25\%$, проводили по три параллельных опыта. По начальным и конечным концентрациям, были рассчитаны

степень очистки (α , %) модельных вод от ионов меди и цинка и сорбционная ёмкость (A , ммоль/г).

Результаты и обсуждение

Была разработана технология получения сорбента, включающая следующие стадии: к раствору хитозана в 3%-ной уксусной кислоте добавляли соответствующие навески ФГШ и ОГ. Полученную гелеподобную смесь гранулировали, дозируя небольшими каплями её в 5% раствор NaOH, выдерживали в течение суток, затем промывали водой до значений pH 7,0–7,5 и сушили при комнатной температуре (рис. 1).

Материал имеет форму зёрен с размером частиц 2–3 мм, которые обладают магнитными свойствами ($\approx 0,02$ Тл). Установлено (рис. 2), что amino- и гидроксильные группы, характерные для хитозана, являются потенциальными функциональными группами, которые образуют комплекс с ионами металлов в процессе хемосорбции. Наблюдаемые пики в диапазоне 1300–1400 см⁻¹ могут указывать на наличие NH-группы, соответствующей аминокгруппе хитозана, ярко выраженный пик 1640 см⁻¹ соответствует группе HC=N.

Широкий пик при 1000–1100 см⁻¹ приходится на C–O растяжение различных кислородсодержащих соединений. Появление полосы в области 610 см⁻¹ поглощения обусловлено формированием кристаллической

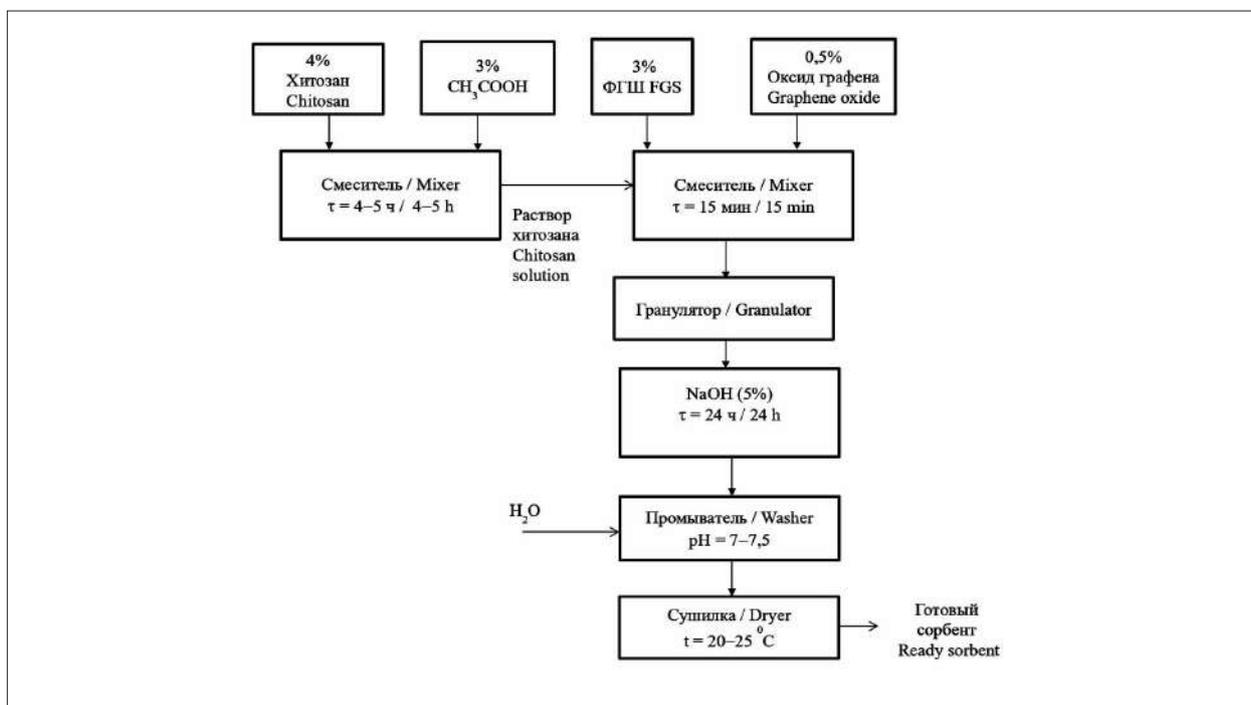


Рис. 1. Блок-схема получения сорбционного материала
Fig. 1. Block diagram for obtaining sorption material

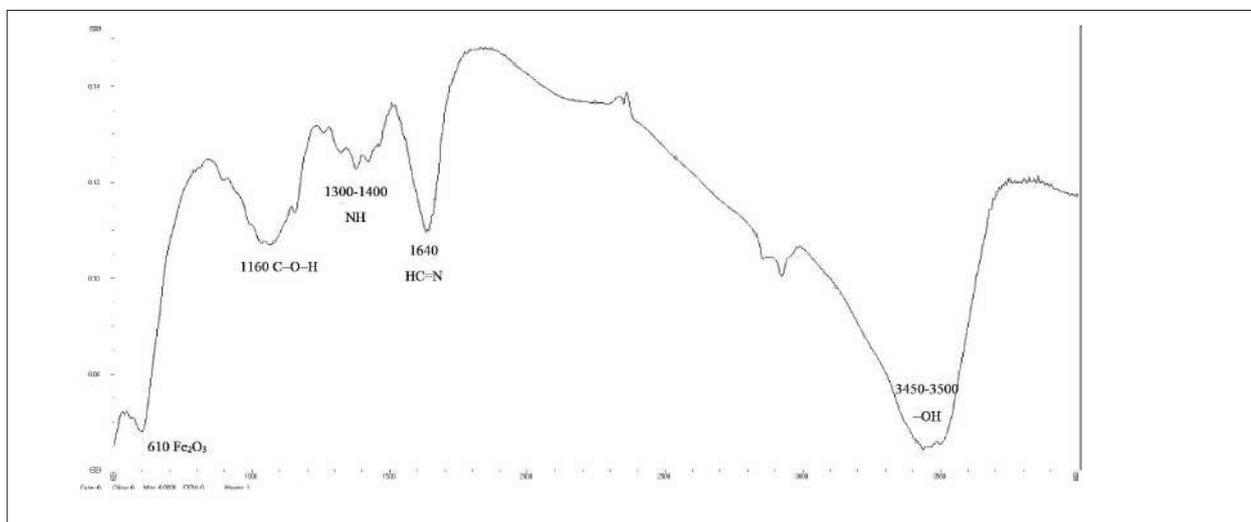


Рис. 2. ИК-спектр сорбента / Fig. 2. IR spectrum of the sorbent

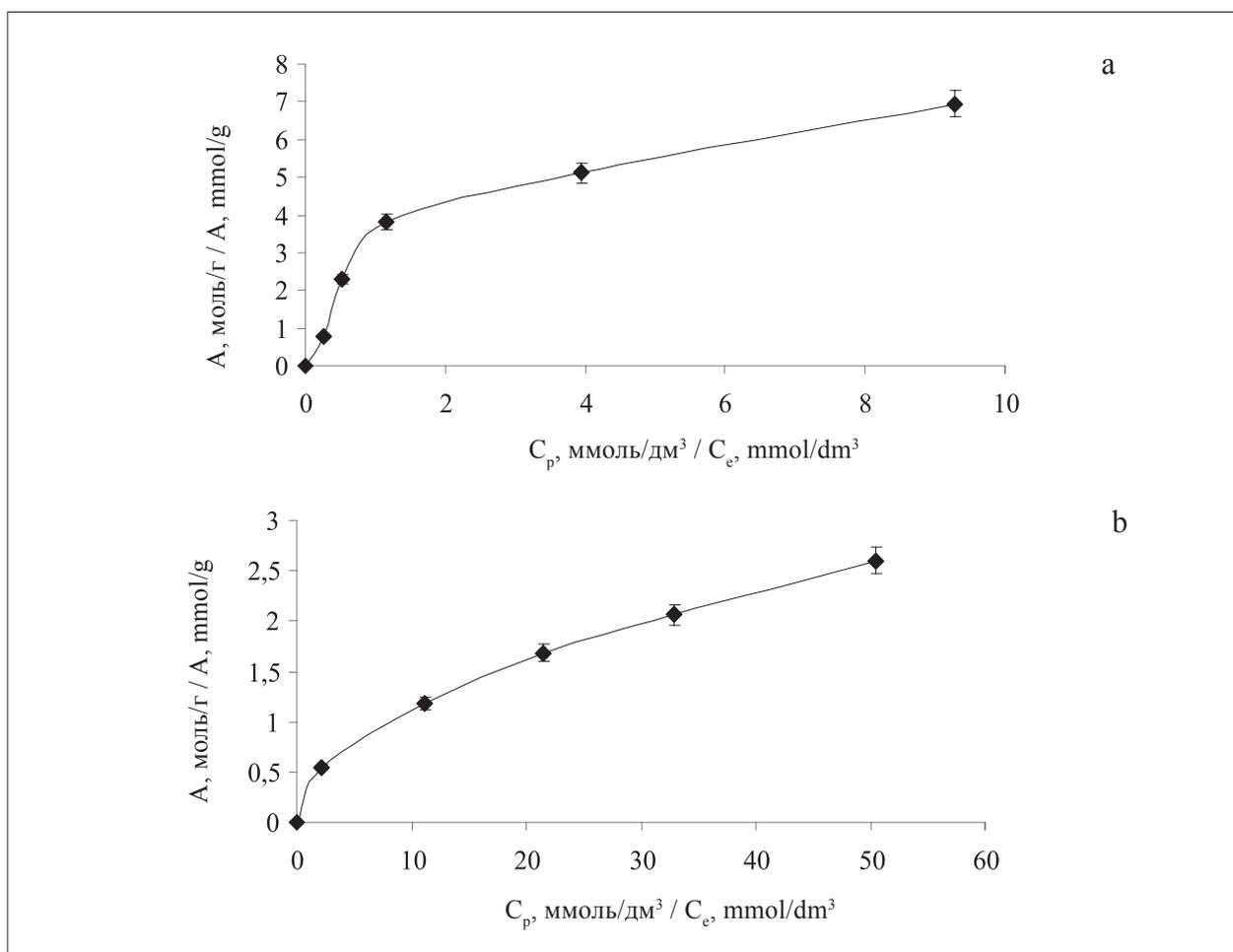


Рис. 3. Изотермы сорбции Cu^{+2} (a) и Zn^{+2} (b)
Fig. 3. Sorption isotherms for Cu^{+2} (a) and Zn^{+2} (b)

фазы Fe_2O_3 , принадлежащей ФГШ. Валентные колебания при $3450\text{--}3500\text{ см}^{-1}$ характерны для группы OH^- .

Наличие отрицательно заряженных функциональных групп OH^- в составе сорбента

позволяет предположить хемосорбционный механизм извлечения ионов тяжёлых металлов из растворов. Результаты исследования сорбционной ёмкости материала по отношению к ионам тяжёлых металлов представлены на рисунке 3.

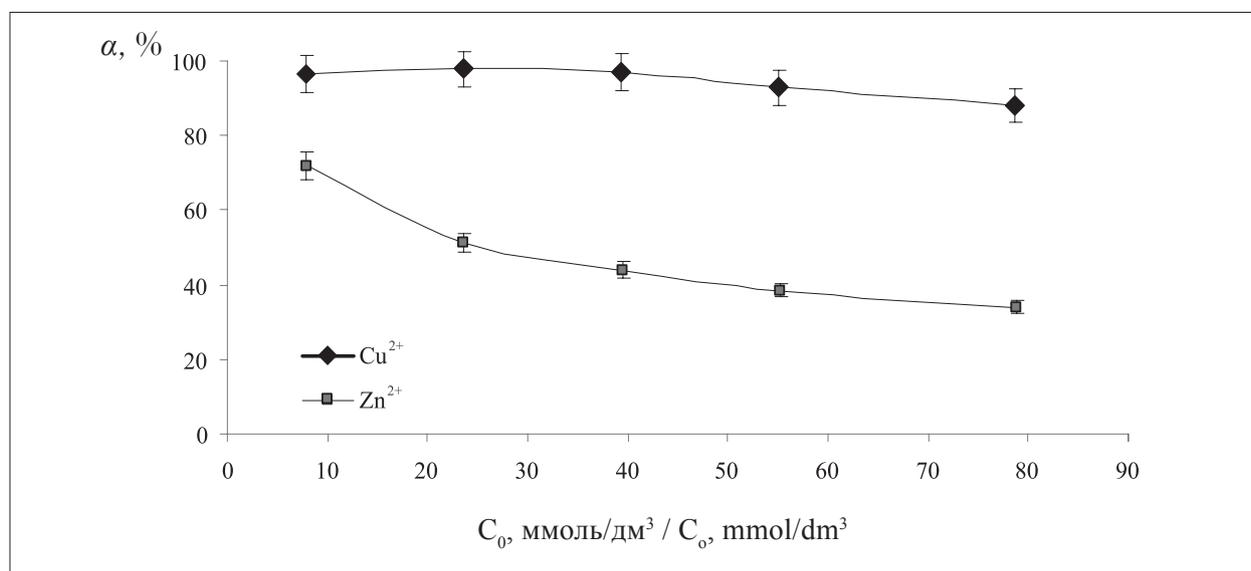


Рис. 4. Степень очистки модельных растворов от Cu^{2+} и Zn^{2+}
 Fig. 4. Purification degree of model solutions from Cu^{2+} and Zn^{2+}

Степень очистки модельных растворов от ионов Cu^{2+} и Zn^{2+} приведена на рисунке 4.

Максимальная сорбционная ёмкость сорбента по отношению к ионам Cu^{2+} составила $6,9 \pm 0,1$ ммоль/г, к ионам Zn^{2+} – $2,6 \pm 0,1$ ммоль/г, при начальной концентрации 78,6 и 76,4 ммоль/дм³ соответственно (рис. 4). При изучении распределения ионов металлов между сорбентом и раствором в состоянии равновесия было установлено, что на начальных участках изотермы сорбции (участок Генри) величина сорбции практически пропорциональна концентрации ионов металлов в растворе. При высоких концентрациях ионов изотермы достигают максимума и выходят на насыщение. Для сорбента изотерма сорбции ионов Cu^{2+} расположена выше, чем для ионов Zn^{2+} (рис. 4). Следовательно, сродство данного сорбента к ионам Cu^{2+} выше, чем к ионам Zn^{2+} , что может быть обусловлено различием физико-химических и электрохимических свойств ионов сорбируемых металлов. Так, например, ионный радиус ионов меди $r(\text{Cu}^{2+}) = 0,73$ нм; для цинка он составляет $r(\text{Zn}^{2+}) = 0,83$ нм. По всей видимости, меньшие по размеру катионы меди могут более глубоко проникать в поры и межзёрненные пространства сорбционного материала и прочнее удерживаться в них. Кроме того, в отличие от цинка, медь имеет намного более положительный стандартный электронный потенциал ($E^\circ(\text{Cu}^{2+}) = +0,337$ В; $E^\circ(\text{Zn}^{2+}) = -0,76$ В). Положительное значение стандартного потенциала меди указывает на возможность самопроизвольного осаждения меди и на невозможность растворения меди

в растворах с концентрацией ионов водорода 1 моль/дм³. Одновременно с этим связь в паре: положительно заряженные Cu^{2+} с более высоким равновесным потенциалом и отрицательно заряженные функциональные группы OH^- , также должна быть более прочной по сравнению с парой катионы Zn^{2+} с отрицательным равновесным потенциалом и отрицательно заряженные функциональные группы OH^- . Это, вероятнее всего, и обуславливает более высокую адсорбционную ёмкость сорбента по отношению к ионам Cu^{2+} [10, 11].

Изотермы сорбции ионов Cu^{2+} и Zn^{2+} разработанным сорбционным материалом относятся к I типу по классификации ИЮПАК, которая составлена на основе классической классификации изотерм адсорбции–десорбции Брунауэра, Деминга, Деминга и Теллера (классификация БДДТ), такой вид характерен при протекании адсорбции с образованием монослоя на пористом твёрдом теле [12].

Заключение

Таким образом, в результате проделанной работы создана технология получения сорбента на основе ферритизированного гальваношлама, терморасширенного оксида графена и хитозана для удаления из водных сред ионов тяжёлых металлов (Cu^{2+} , Zn^{2+}). Можно сделать вывод о более высокой степени очистки воды от ионов меди (90–98%), чем от цинка (30–70%) полученным сорбционным материалом, что обусловлено различием

физико-химических и электрохимических свойств (размеры, вес и стандартный потенциал) сорбируемых металлов. Извлечение ионов металлов идёт по хемосорбционному механизму, что подтверждается наличием на поверхности материала функциональных амино- и гидроксильных групп. Показано, что изотермы сорбции ионов Cu^{2+} и Zn^{2+} разработанным сорбционным материалом относятся к I типу по классификации БДДТ, что характерно для протекания адсорбции с образованием монослоя на пористом твёрдом теле.

Литература

1. Николаева Л.А., Исхакова Р.Я. Оценка возможности использования карбонатного шлама для очистки карстового озера Большое Голубое // Теоретическая и прикладная экология. 2022. № 1. С. 109–114.
2. Степанова С.В., Алексеева А.А. Очистка модельных вод от ионов алюминия сточными водами натронеи варки целлюлозы из плодовых оболочек злаковых культур // Теоретическая и прикладная экология. 2022. № 1. С. 124–128.
3. Guibal E. Interactions of metal ions with chitosan-based sorbents // A review. Sep. Purif. Technol. 2004. V. 38. No. 1. P. 43–74.
4. Wang J., Chen C. Chitosan-based biosorbents: Modification and application for biosorption of heavy metals and radionuclides // Bioresour. Technol. 2014. V. 160. P. 129–141.
5. Guibal E., Vincent T., Navarro R. Metal ion biosorption on chitosan for the synthesis of advanced materials // J. Mater. Sci. 2014. V. 49. No. 16. P. 5505–5518.
6. Gerente C., Lee V.K.C., le Cloirec P., McKay G. Application of chitosan for the removal of metals from wastewaters by adsorption – mechanisms and models review // Crit. Rev. Environ. Sci. Technol. 2007. V. 37. No. 1. P. 41–127.
7. Скотникова Д.С., Мочалова А.Е., Смирнова Л.А. Высокоэффективные флокулянты на основе хитозана и его производных для очистки нефтесодержащих сточных вод и процессов водоподготовки // Известия Уфимского научного центра РАН. 2018. № 3–3. С. 98–102.
8. Пятигорская Н.В., Каргин В.С., Брких Г.Э. Виды модификации хитозана путём использования различных дериватирующих агентов // Медико-фармацевтический журнал «Пuls». 2021. Т. 23. № 4. С. 23–30.
9. Политаева Н.А., Смятская Ю.А., Слугин В.В., Прохоров В.В., Шайхиев И.Г. Сорбционные свойства материалов на основе хитозана и углеродных добавок // Вестник Технологического университета. 2017. Т. 20. № 23. С. 100–103.
10. Справочник по электрохимии / Под ред. А.М. Сухотина. Л.: Химия, 1981. 488 с.

11. Рабинович В.А. Краткий химический справочник. Л.: Химия, 1978. 392 с.
12. Товбин Ю.К. Молекулярная теория адсорбции в пористых телах. М.: Физматлит, 2013. 624 с.

References

1. Nikolaeva L.A., Iskhakova R.Ya. The use of carbonate sludge for cleaning karst Lake Bol'shoye Goluboye // Theoretical and Applied Ecology. 2022. No. 1. P. 109–114 (in Russian). doi: 10.25750/1995-4301-2022-1-109-114
2. Stepanova S.V., Alekseeva A.A. Purification of model waters from aluminum ions by wastewater from the soda pulping of cellulose from the shells of cereals // Theoretical and Applied Ecology. 2022. No. 1. P. 124–128 (in Russian). doi: 10.25750/1995-4301-2022-1-124-128
3. Guibal E. Interactions of metal ions with chitosan-based sorbents // A review. Sep. Purif. Technol. 2004. V. 38. No. 1. P. 43–74. doi: 10.1016/j.seppur.2003.10.004
4. Wang J., Chen C. Chitosan-based biosorbents: Modification and application for biosorption of heavy metals and radionuclides // Bioresour. Technol. 2014. V. 160. P. 129–141. doi: 10.1016/j.biortech.2013.12.110
5. Guibal E., Vincent T., Navarro R. Metal ion biosorption on chitosan for the synthesis of advanced materials // J. Mater. Sci. 2014. V. 49. No. 16. P. 5505–5518. doi: 10.1007/s10853-014-8301-5
6. Gerente C., Lee V.K.C., le Cloirec P., McKay G. Application of chitosan for the removal of metals from wastewaters by adsorption – mechanisms and models review // Crit. Rev. Environ. Sci. Technol. 2007. V. 37. No. 1. P. 41–127. doi: 10.1080/10643380600729089
7. Skotnikova D.S., Mochalova A.E., Smirnova L.A. Highly efficient flocculants based on chitosan and its derivatives for the treatment of oily wastewater and water treatment processes. // Izvestiya Ufimskogo nauchnogo tsentra RAN. 2018. No. 3–3. P. 98–102 (in Russian). doi: 10.31040/2222-8349-2018-3-3-98-102
8. Pyatigorskaya N.V., Kargin V.S., Brkich G.E. Types of modification of chitosan by using various derivatizing agents // Mediko-farmatsevticheskiy zhurnal "Pul's". 2021. V. 23. No. 4. P. 23–30 (in Russian). doi: 10.26787/nydha-2686-6838-2021-23-4-23-30
9. Politaeva N.A., Smyatskaya Yu.A., Slugin V.V., Prokhorov V.V., Shaikhiev I.G. Sorption properties of materials based on chitosan and carbon additives // Vestnik Tekhnologicheskogo universiteta. 2017. V. 20. No. 23. P. 100–103 (in Russian). doi: 10.18412/1816-0395-2016-5-34-39
10. Handbook of Electrochemistry / Ed. A.M. Sukhotina. Leningrad: Khimiya, 1981. 488 p. (in Russian).
11. Rabinovich V.A. Kratkiy khimicheskiy spravochnik. Leningrad: Khimiya, 1978. 392 p. (in Russian).
12. Tovbin Yu.K. Molecular theory of adsorption in porous bodies. Moskva: Fizmatlit, 2013. 624 p. (in Russian).

Фитоэкстракция свинца и кадмия из почвогрунтов полигонов отходов некоторыми сельскохозяйственными культурами

© 2023. Л. В. Мосина¹, д. б. н., профессор,
Ю. А. Холопов², к. с.-х. н., доцент,

Ю. А. Жандарова³, руководитель организации,

¹Российский государственный аграрный университет – МСХА
имени К. А. Тимирязева,

127434, Россия, г. Москва, ул. Тимирязевская, д. 49,

²Самарский государственный университет путей сообщения,
443066, Россия, г. Самара, ул. Свободы, д. 2В,

³РОО «Экологический надзор»,

105066, Россия, г. Москва, ул. Нижняя Красносельская, д. 35,

e-mail: mosina.l.v@yandex.ru, kholopov@bk.ru, zhandarova-julia@mail.ru

Представлены результаты исследования аккумуляции Pb и Cd различными сельскохозяйственными культурами, выращенными на почвогрунтах, отобранных с глубины 0–10 см полигона твёрдых коммунальных отходов «Саларьево». В качестве растений-фитоэкстракторов использовали мятлик луговой (*Poa pratensis*), ежу сборную (*Dactylis glomerata*), горчицу белую (*Sinapis alba*), подсолнечник однолетний (*Helianthus annuus*), горох посевной (*Pisum sativum*), кукурузу обыкновенную (*Zea mays*).

Установлено, что при выращивании на почвогрунте полигона сельскохозяйственные культуры аккумулируют примерно вдвое больше тяжёлых металлов (ТМ) по сравнению с контролем. Выявлена различная количественная экстрагирующая способность разных растений по отношению к Pb и Cd. Ряд по увеличению экстрагирующей способности растений для Pb имеет вид: горох посевной – ежа сборная – подсолнечник однолетний – мятлик луговой – горчица белая – кукуруза обыкновенная. Ряд для Cd: горох посевной – горчица белая – мятлик луговой – кукуруза обыкновенная – подсолнечник однолетний – ежа сборная. Таким образом, горох посевной обладает минимальной аккумулирующей способностью к Pb и Cd. По отношению к кадмию наиболее оптимальным фитоэкстрактором является ежа сборная, которая характеризуется ещё и высокой степенью устойчивости к данному элементу. Высокой очищающей способностью также характеризуются культуры подсолнечника однолетнего и кукурузы обыкновенной. Для фитоэкстракции свинца из загрязнённых почв можно рекомендовать кукурузу обыкновенную.

Ключевые слова: биоаккумуляция, полигон твёрдых коммунальных отходов, тяжёлые металлы, устойчивость, фиторемедиация, экологическое состояние окружающей среды.

Phytoextraction of lead and cadmium from soils of landfills by some agricultural crops

© 2023. L. V. Mosina¹ ORCID: 0000-0003-2120-0389

Yu. A. Kholopov² ORCID: 0000-0002-2442-7186

Yu. A. Zhandarova³ ORCID: 0000-0001-8173-4070

¹Russian State Agrarian University – Moscow Timiryazev Agricultural Academy,
49, Timiryazevskaya St., Moscow, Russia, 127434,

²Samara State Transport University,

2B, Svobody St., Samara, Russia, 443066,

³NGO “Environmental Supervision”,

35, Nizhnyaya Krasnoselskaya St., Moscow, Russia, 105066,

e-mail: mosina.l.v@yandex.ru, kholopov@bk.ru, zhandarova-julia@mail.ru

The results of the study of the accumulation of heavy metals (Pb and Cd) by various agricultural crops grown on soils selected from a depth of 0–10 cm of the landfill of municipal solid waste (MSW) “Salar’ev” in comparison with the control sod-podzolic soil, as well as their stability within 30 days from the moment of emergence are presented.

The studied phytoextractor plants were meadow bluegrass (*Poa pratensis*), cocksfoot (*Dactylis glomerata*), white mustard (*Sinapis alba*), annual sunflower (*Helianthus annuus*), seed peas (*Pisum sativum*), common corn (*Zea mays*).

It was found that when grown on the soil of the landfill, agricultural crops accumulate about twice as much heavy metals as compared to the control soil. A series to increase the extracting ability of plants for Pb has the form: seed peas – cocksfoot – sunflower annual – meadow bluegrass – white mustard – common corn. Row for Cd is seed peas – white mustard – meadow bluegrass – common corn – annual sunflower – cocksfoot. With regard to the extracting ability of the studied heavy metals, the minimum accumulating ability of the pea culture is common. The rest of the cultures exhibit different extractive ability, which does not fit into the general series. In relation to cadmium, the cocksfoot is the best phytoextractor, which is also characterized by a high degree of stability. The crops of annual sunflower and common corn are also characterized by a high cleaning ability. Common corn is also recommended for phytoextraction of lead.

Keywords: bioaccumulation, municipal solid waste landfills, heavy metals, sustainability, phytoremediation, ecological state of the environment.

Размещение твёрдых коммунальных отходов (ТКО) на свалках/полигонах ведёт к отчуждению свободных территорий в пригородных районах и ограничивает их использование для строительства жилых зданий. Совместное захоронение различных видов отходов может вести к образованию опасных соединений и неуправляемой их миграции в окружающую среду (ОС). В результате вокруг полигонов формируются зоны многокомпонентного загрязнения почвы, атмосферного воздуха, поверхностных и подземных вод [1].

Московская область – крупнейший индустриальный центр России с населением около 8 млн человек, принимающий значительную часть ТКО г. Москвы (население 12,5 млн на 2022 г.). В 2020 г. на территории Московской области было размещено 4,07 млн т ТКО. Стоит задача снижения объёмов захоронения отходов на 50% за счёт создания современных комплексов по их переработке [2]. Однако имеющиеся полигоны ТКО представляют существенную угрозу для ОС и здоровья населения.

По данным на 2021 г. в Московской области числятся 45 полигонов: 32 из них уже закрыты, 12 рекультивируются и 1 находится в стадии строительства. Среди рекультивируемых полигонов наибольшую площадь имеют Хметьево (79,4 га), Дмитровский (Икша-2) (63,2 га), Кучино (59 га), Саларьево (59 га), Некрасовка (17,5 га), Долгопрудный (13,9 га); среди закрытых – Щербинка (123,5 га), Тимохово (108,6 га), Сосенки (40 га) и Лесная (32,9 га) [3].

Несмотря на закрытие ряда полигонов, опасность загрязнения территории, в частности, тяжёлыми металлами (ТМ), остаётся, что связано с длительностью пребывания данных поллютантов в этой среде и трудностью их извлечения. Так, период полужизни ТМ из почвы в условиях лизиметров варьирует в зависимости от вида металла: для Zn – от 70 до 510; для Cd – от 13 до 1100; для Cu – от 310 до 1500; для Pb – от 740 до 5900 лет [4].

Высокий уровень загрязнения полигонов ТКО формирует неблагоприятный экологический фон, связанный, например, с накоплением микотоксинов [5], что ещё больше увеличивает опасность функционирования полигона.

Одним из приёмов снижения экологической напряжённости территорий полигонов ТКО является фиторемедиация с привлечением растений-фитоэкстракторов. По достижении определённой фазы, в которой интенсивная аккумуляция поллютантов заканчивается, растения скашиваются, вынося в своей биомассе загрязняющие вещества. Эффективность фиторемедиации зависит от целого ряда факторов, среди которых способность различных растений к аккумуляции металлов, толерантность к их высокому содержанию [6]. Изучению данной проблемы посвящён ряд работ [7–13]. В литературных источниках отмечается невысокий коэффициент биологического поглощения ТМ, повысить который возможно на основе современных технологий [14, 15]. Однако изученность этого вопроса для полигонов ТКО крайне слабой.

Поэтому целью нашей работы явилось выявление наиболее эффективных растений-фитоэкстракторов тяжёлых металлов для обоснования целесообразных путей очистки полигонов твёрдых коммунальных отходов.

Объекты и методы исследования

Объектом исследования явился один из крупнейших полигонов ТКО в Московском регионе – полигон ТКО «Саларьево». Данный полигон расположен на территории Новой Москвы (Ленинский район на юго-западе Москвы, с 1 июля 2013 г. – территория Москвы). Площадь полигона – 59 га, высота – около 80 м, крутизна склона – 30–35°, длина склона – около 100 м. Полигон расположен вблизи населённых пунктов: посёлка Мосрентген, деревень Дудкино, Румянцево, Картмазово.

На минимальном удалении от полигона (от южной экспозиции склона полигона – всего около 30 м) находится деревня Саларьево, на расстоянии около 8 км находится аэропорт «Внуково».

В качестве растений-фитоэкстракторов использовали мятлик луговой (*Poa pratensis*), ежу сборную (*Dactylis glomerata*), горчицу белую (*Sinapis alba*), подсолнечник однолетний (*Helianthus annuus*), горох посевной (*Pisum sativum*), кукурузу обыкновенную (*Zea mays*).

Исследования проводили в условиях лабораторного вегетационного опыта. Растения выращивали в сосудах объёмом 3 л, которые были заполнены отобранными с глубины 0–10 см и 0–50 см образцами почвогрунтов полигона. Продолжительность периода наблюдений составляла 30 сут с момента появления всходов, по истечении которых определяли высоту растений и содержание в них ТМ. В качестве контроля использовали зональную легкосуглинистую дерново-подзолистую почву (ДП почва), которая служила фоновой. Почву отбирали на территории Лиственничной аллеи РГАУ-МСХА имени К.А. Тимирязева с глубины верхнего 0–10 см гумусового горизонта. За показатель устойчивости принимали разницу отметок высот растений, произрастающих на почвогрунтах полигона и контрольной почве, выраженную в %. Чем выше различия интенсивности роста растений на контрольной почве и почвогрунтах полигона, тем ниже их устойчивость. Данный критерий предлагается авторами, как более простой в применении.

Для определения содержания ТМ растения срезали, высушивали, навеску 10 г сухой растительной массы сжигали в муфеле в течение 8 ч при температуре 500 °С. Зола смачивали бидистиллятом, растворяли в 2,5 мл 20% HCl, охлаждали. Полученный раствор, не фильтруя, переносили через воронку в мерную колбу на 50 мл, доводили раствор в колбе до метки бидистиллированной водой, содержимое колбы перемешивали и оставляли до осветления и последующего определения свинца и кадмия на атомно-абсорбционном спектрофотометре «Perkin-Elmer-503» в пламени ацетилен-воздух. Параллельно определяли содержание ТМ в почвогрунтах полигона мощностью 0–10 см, 0–50 см и в контрольной почве по общепринятой методике [16]. Определение коэффициента биологического поглощения (КБП) проводили путём отношения содержания ТМ в растениях (золе растений) к его содержанию в почве/почвогрунте. Все ис-

следования выполняли в трёхкратной повторности, достоверность различий в содержании ТМ для разных культур и почв определяли по критерию Стьюдента, в обсуждении используются данные, подтверждённые статистической обработкой с достоверностью при $P \geq 0,95$.

Результаты и обсуждение

Как общая закономерность отмечается более высокое содержание ТМ в растениях, выращенных на грунтах поверхностного слоя полигона, что, вероятно, обусловлено аэральным характером загрязнения, связанного с поступлением загрязняющих веществ с ввозимым городским мусором. Содержание Pb и Cd в верхнем 0–10 см слое почвогрунта полигона соответственно составило 57 ± 4 и $3,51 \pm 0,28$ мг/кг; в слое 0–50 см – $42,9 \pm 3,8$ и $2,52 \pm 0,19$, что значительно выше по сравнению с контрольной ДП почвой, в которой содержание Pb было $23,2 \pm 1,8$, а Cd – $0,49 \pm 0,04$ мг/кг. Данные характеристики превышают значения нормативов (ПДК и ОДК), особенно по содержанию Cd. Его содержание в почвогрунте полигона ($3,51 \pm 0,28$ мг/кг) в 7 раз выше по сравнению с контролем ($0,49$ мг/кг) и ОДК ($0,5$ мг/кг). Установлены также превышения ПДК для Pb, но они менее выражены. Наблюдается превышение концентрации данного ТМ в 2,5 раза в почвогрунтах полигона (57 ± 4 мг/кг) по сравнению с контролем ($23,2 \pm 1,8$ мг/кг) и почти двукратное превышение ПДК (32 мг/кг). При этом в контроле содержание Pb не превышает значение ПДК.

Растения, произрастающие на контрольной почве, аккумулируют значительно меньшее количество ТМ (табл. 1).

Содержание ТМ в исследуемых культурах, то есть их аккумулирующая способность, колеблется в зависимости от вида растений и глубины отбора почвогрунтов из тела полигона, используемых для выращивания. Максимальное содержание Pb – $23,6 \pm 2,1$ мг/кг выявлено для кукурузы обыкновенной при выращивании на верхнем 0–10 см слое почвогрунта полигона. Высокой аккумулирующей способностью обладали горчица белая ($11,4 \pm 1,0$), мятлик луговой ($10,3 \pm 0,9$), подсолнечник однолетний ($9,43 \pm 0,8$ мг/кг). Аккумулирующая способность по отношению к Pb у изученных культур, произрастающих на верхнем 0–10 см слое почвогрунтов полигона, может быть представлена следующим рядом (в порядке возрастания): горох посевной ($1,09 \pm 0,09$) – ежа сборная ($2,20 \pm 0,19$) – под-

Таблица 1 / Table 1

Содержание Pb и Cd в 30-суточных сельскохозяйственных культурах, выращенных на почвогрунтах полигона ТКО «Саларьево» (мг/кг сухой массы)
Pb and Cd content in agricultural culture grown during 30 days of growth on soils of the landfill of MSW "Salar'ev" (mg/kg dry masses)

Сельскохозяйственная культура Agricultural crop	Содержание поллютантов в растениях, мг/кг сухой массы The content of pollutants in plants, mg/kg dry masses					
	Pb		Cd		Pb	Cd
	0–10 см 0–10 cm	0–50 см 0–50 cm	0–10 см 0–10 cm	0–50 см 0–50 cm	ДП почва (контроль) Sod-podzolic soil (control)	
Мятлик луговой <i>Poa pratensis</i>	10,3±0,9*	8,7±0,7*	2,15±0,2*0	1,200±0,010*	4,4±0,4	0,310±0,027
Ежа сборная <i>Dactylis glomerata</i>	2,2±0,19*	1,01±0,09*	4,2±0,37*	0,85±0,07*	0,85±0,07	0,360±0,029
Горчица белая <i>Sinapis alba</i>	11,4±1,0*	9,6±0,8*	1,75±0,15*	1,50±0,13*	6,2±0,5	0,280±0,024
Подсолнечник однолетний <i>Helianthus annuus</i>	10,1±0,9*	9,4±0,8*	3,2±0,28*	1,19±0,10*	1,03±0,09	0,320±0,027
Горох посевной <i>Pisum sativum</i>	1,09±0,09*	0,85±0,07*	0,158±0,010*	0,102±0,010	0,102±0,010	0,100±0,009
Кукуруза обыкновенная <i>Zea mays</i>	23,6±2,1*	21,5±1,9*	2,9±0,26*	2,40±0,21*	16,2±1,4	0,330±0,028

Примечание: * – статистически значимые различия при $p < 0,05$.
Note: * – statistically significant differences at $p < 0.05$.

солнечник однолетний (10,1±0,9) – мятлик луговой (10,3±0,9) – горчица белая (11,4±1,2) – кукуруза обыкновенная (23,6±1,2 мг/кг). На контрольной ДП почве ряд аккумуляции Pb в целом сохраняется. Высокая аккумулирующая способность горчицы белой и кукурузы обыкновенной по отношению к Pb, установленная в данном исследовании, совпадает с данными, полученными ранее в работе [17].

По отношению к Cd аккумулирующая способность изученных культур представляет следующий ряд (в порядке возрастания): горох посевной (0,158±0,010) – горчица белая (1,75±0,15) – мятлик луговой (2,15±0,20) – кукуруза обыкновенная (2,90±0,26) – подсолнечник однолетний (3,20±0,28) – ежа сборная (4,20±0,37 мг/кг). В отношении экстрагирующей способности Cd наибольшей аккумулирующей способностью характеризуется ежа сборная, а культуры гороха посевного, кукурузы обыкновенной накапливают его значительно меньше. Имеющиеся различия в экстрагирующей способности изучаемых растений подтверждаются литературными данными [18–20].

В условиях произрастания на ДП почве ряд аккумуляции Cd изученными растениями также имеет аналогичный вид (в порядке возрастания): горох посевной (0,100±0,009) – горчица белая (0,280±0,024) – мятлик луговой

(0,310±0,027) – подсолнечник однолетний (0,320±0,027) – кукуруза обыкновенная (0,330±0,028) – ежа сборная (0,360±0,029 мг/кг). Исключение составляют только культуры подсолнечника и кукурузы. Однако близкие значения аккумулирующей способности этих растений – соответственно 0,320±0,027 и 0,330±0,028 мг/кг могут уравнивать их способность к поглощению данного ТМ из контрольной почвы.

По сравнению с контрольной почвой эти различия следующие: максимальные у ежи сборной (4,20±0,37 и 0,320±0,027), что составляет более чем десятикратное превышение, минимальные – у гороха посевного (0,158±0,010 и 0,100±0,009). Ежа сборная максимально извлекает из верхнего слоя полигона Cd, способствуя его очищению, горох посевной практически не реагирует на качество почвогрунтов полигона.

Исследуемые культуры характеризуются различными физиолого-биохимическими свойствами, что обуславливает неоднозначную биоаккумуляцию Pb и Cd. Кроме того, у растений отмечается большая аккумулирующая способность по отношению к Cd, чем по отношению к Pb.

Результаты определения содержания Pb и Cd в растениях позволили рассчитать КБП (табл. 2).

Таблица 2 / Table 2

Коэффициент биологического поглощения Pb и Cd 30-суточными растениями, выращенными на верхнем 0–10 см слое почвогрунтов полигона и фоновой почве / The coefficient of biological absorption of Pb and Cd by plants grown during 30 days of growth on the upper 0–10 cm layer of landfill soils and background sod-podzolic soil

Сельскохозяйственная культура Agricultural crop	Почвогрунт, 0–10 см Soil-ground, 0–10 cm		Фоновая почва (контроль), 0–10 см Sod-podzolic soil (control), 0–10 cm	
	Pb	Cd	Pb	Cd
Мятлик луговой <i>Poa pratensis</i>	0,18	0,61	0,2	4,7
Ежа сборная <i>Dactylis glomerata</i>	0,04	1,19	0,1	4,3
Горчица белая <i>Sinapis alba</i>	0,20	0,50	0,35	1,42
Подсолнечник однолетний <i>Helianthus annuus</i>	0,18	0,91	0,44	2,7
Горох посевной <i>Pisum sativum</i>	0,02	0,42	0,004	0,3
Кукуруза обыкновенная <i>Zea mays</i>	0,42	0,83	0,97	3,7

Таблица 3 / Table 3

Высота 30-суточных растений, выращенных в условиях почвогрунта полигона ТКО «Саларьево» и фоновой почвы / The height of 30-days-old plants growing in the soil-ground of the landfill MSW “Salar’evo” and sod-podzolic (SP) soil

Сельскохозяйственная культура Agricultural crop	Почвогрунт Soil-ground	Фоновая почва SP soil (control)	Снижение высоты Lowering the height	
			см / cm	%
Мятлик луговой <i>Poa pratensis</i>	10,0±0,9	17,0±1,5	7,0	70
Ежа сборная <i>Dactylis glomerata</i>	27,0±2,4	32,2±2,8	5,2	19
Горчица белая <i>Sinapis alba</i>	20,0±1,8	22,8±2,1	2,8	14
Подсолнечник однолетний <i>Helianthus annuus</i>	22,0±1,9	28,4±2,5	6,4	29
Горох посевной <i>Pisum sativum</i>	15,0±1,4	17,0±1,5	2,0	13,3
Кукуруза обыкновенная <i>Zea mays</i>	23,0±2,1	51,0±4,5	28,0	122

Фиторемедиационная способность по отношению к ТМ определяется не только степенью их аккумуляции, но в значительной степени зависит от устойчивости растений к загрязняющим веществам. При этом за показатель устойчивости принимали разницу отметок высоты культур, произрастающих на почвогрунтах полигона и фоновой почве. При большей разнице отметок высоты устойчивость признавалась менее выраженной, и наоборот, меньшая амплитуда различий характеризовала более устойчивые растения.

Как показали исследования, наряду с разной биоаккумулирующей способностью изменялась и устойчивость растений, что выражалось в различной интенсивности роста

в опытных вариантах по сравнению с контролем. Разные культуры по-разному реагируют на свойства почвогрунтов, т. е. качество субстрата. Различия при этом составляют от 13,3 до 122% для 30-суточных растений, произрастающих в условиях почвогрунта, по сравнению с фоновой почвой (табл. 3).

Высота изучаемых растений значительно различается в зависимости от вида культур и условий произрастания и составляет от 10,0±0,9 до 27,0±2,4 см при выращивании на отобранном на полигоне почвогрунте и от 17,0±1,5 см до 51,0±4,5 см на фоновой почве. Разница отметок высот по вариантам опыта составляет от 13,3 до 122%. Корреляционный анализ показал устойчивую отрицательную

связь между содержанием Pb и Cd в почве/почвогрунте и высотой растений для мятлика лугового (-0,915 и -0,935 соответственно), кукурузы обыкновенной (-0,946 и -0,962 соответственно). Аналогичная корреляция выявлена между содержанием Pb и Cd в фитомассе и высотой побегов растений: для мятлика лугового (-0,899 и -0,930 соответственно) и кукурузы обыкновенной (-0,849 и -0,961 соответственно).

Различная интенсивность роста исследуемых культур в опытных вариантах по сравнению с контролем, принимаемая за устойчивость изучаемых растений, представляет следующий вид (в порядке снижения): горох посевной, горчица белая > ежа сборная > подсолнечник однолетний > мятлик луговой > кукуруза обыкновенная.

Минимальные различия в интенсивности роста в этот период отмечены у гороха посевного и горчицы белой – соответственно 13,3 и 14,0%. Максимальное различие (122%) – у растений кукурузы обыкновенной.

У кукурузы отмечена чёткая связь между степенью устойчивости и содержанием Pb в фитомассе. Максимальное среди испытанных культур снижение ростового показателя 122% сопровождается максимальным накоплением Pb ($23,6 \pm 2,1$ мг/кг сухой массы) в фитомассе данной культуры.

Таким образом, максимальной способностью очищать от загрязнения свинцом верхний слой полигона обладают растения кукурузы обыкновенной и горчицы белой, что делает их предпочтительными для целей фиторемедиации загрязнённых почвогрунтов полигонов.

По отношению к загрязнению кадмием на первых этапах развития наиболее оптимальной выступает ежа сборная, высокой очищающей способностью также характеризуются растения подсолнечника однолетнего, кукурузы обыкновенной.

Принимая во внимание достаточно высокую биоаккумулирующую способность ежи сборной в отношении Cd и возможность сохранять при этом ростовой показатель (снижение высоты растения под воздействием фактора лишь около 19%), можно рекомендовать эту культуру для целей фиторемедиации загрязнённого почвогрунта полигона.

Отобранные для фиторемедиации растения рекомендуются высаживать на почвогрунтах полигонов, выращивать в течение не менее 30 дней, скашивать надземную биомассу и вывозить для утилизации.

Выводы

1. Для целей фиторемедиации почвогрунтов, загрязнённых соединениями свинца, в условиях полигона ТКО «Саларьево» можно использовать 30-дневные растения кукурузы обыкновенной и горчицы белой. Аккумулирующая способность по отношению к Pb у изученных культур, выращенных на верхнем 10-см слое почвогрунтов полигона, может быть представлена следующим рядом (в порядке возрастания): ежа сборная – горох посевной – подсолнечник однолетний – мятлик луговой – горчица белая – кукуруза обыкновенная.

2. По отношению к кадмию высокой аккумуляющей способностью характеризуется ежа сборная, которая обладает ещё и высокой степенью устойчивости. Высокая очищающая способность отмечается также для подсолнечника однолетнего и кукурузы обыкновенной. Аккумулирующая способность изученных культур возрастает в следующем ряду: горох посевной – горчица белая – мятлик луговой – кукуруза обыкновенная – подсолнечник однолетний – ежа сборная.

3. Устойчивость растений к ТМ в условиях опыта возрастала в ряду: кукуруза обыкновенная < мятлик луговой < подсолнечник однолетний < ежа сборная < горох посевной, горчица белая.

Литература

1. Чекушина Е.В., Каминская А.А. Мониторинг свалок и полигонов // Твёрдые бытовые отходы. 2006. № 11. С. 10–11.
2. Информационный выпуск «О состоянии природных ресурсов и окружающей среды Московской области в 2020 году» [Электронный ресурс] <https://mer.mosreg.ru/download/document/10132535> (Дата обращения: 19.01.22).
3. Список свалок в Москве и Московской области [Интернет-ресурс] <https://musoreco.ru/problemu/svalkimusora.htm> (Дата обращения: 12.10.21).
4. Jimura K., Jto H., Chino M., Morishita T., Hirata H. Behavior of contaminants heavy metals in soil plant system // Proc. Inst. Sem. SEF MIA. Tokyo, 1977. 357 p.
5. Mosina L.V., Chupakina G.N., Maslennikov P.V., Zhandarova J.A., Dovletyarova E.A. Municipal solid waste landfills as a source of mycotoxins contamination in soil // IOP Conference Series Earth and Environmental Science. 2020. V. 548. No. 2. Article No. 022063.
6. Кошчик Г.Н. Проблемы и перспективы фиторемедиации почв, загрязнённых тяжёлыми металлами (обзор литературы) // Почвоведение. 2014. № 9. С. 1113–1130.

7. Киреева Н.А., Григориади А.С., Багаутдинов Ф.Я. Фиторемедиация как способ очищения почв, загрязнённых тяжёлыми металлами // Теоретическая и прикладная экология. 2011. № 3. С. 4–10.

8. Янкевич М.И., Хадеева В.В., Мурыгина В.П. Биоремедиация почв: вчера, сегодня, завтра // Биосфера. 2015. Т. 7. № 2. С. 199–208.

9. Хужжиев С.О., Бахрамов И.З., Сайфуллаев А.Ф. Фиторемедиация почв, загрязнённых тяжёлыми металлами // Естественные науки. 2022. № 2 (7). С. 37–45.

10. Маджугина Ю.Г., Кузнецов В.В., Шевякова Н.И. Растения полигонов захоронения бытовых отходов мегаполисов как перспективные виды для фиторемедиации // Физиология растений. 2008. Т. 55. № 3. С. 453–463.

11. Галиулин Р.В., Галиулина Р.А., Кочуров Б.И. Фиторемедиация почв, загрязнённых тяжёлыми металлами // Теоретическая и прикладная экология. 2009. № 4. С. 71–75.

12. Линдиман А.В., Шведова Л.В., Тукумова Н.В., Невский А.В. Фиторемедиация почв, содержащих тяжёлые металлы // Экология и промышленность России. 2008. № 9. С. 45–47.

13. Заболотских В.В., Васильев А.В., Танких С.Н., Карпович Е.Е. Экспериментальные исследования эффективности фиторемедиации почв, загрязнённых нефтью, нефтепродуктами и тяжёлыми металлами // Академический вестник ЕЛПИТ. 2020. Т. 5. № 2 (12). С. 25–47.

14. Гладков Е.А., Гладкова О.В. Экобиоготехнологические подходы для повышения коэффициента биологического поглощения растений в фиторемедиации // Известия Тульского государственного университета. Науки о Земле. 2019. № 4. С. 32–40.

15. Ольшанская Л.Н., Собгайда Н.А., Валиев Р.Ш. Влияние энергии внешних физических полей на кинетику и механизм фиторемедиации ионов металлов из загрязнённых стоков // Экология и промышленность России. 2014. № 1. С. 13–17.

16. Зырин Н.Г., Обухов А.И., Ковнацкий Е.Ф., Росляков Н.Н. Инструментальные методы в экологическом мониторинге педосферы // Вопросы контроля загрязнения природной среды. Л.: Гидрометеиздат, 1981. С. 144–150.

17. Сираждинов Р.Ж., Кухтин П.В., Левов А.А., Морозов В.Ю., Семкина О.С. Управление в городском хозяйстве. М.: Компания КноРус, 2009. 352 с.

18. Постников Д.А., Кузнецов С.В. Аккумуляция тяжёлых металлов растениями белой горчицы в условиях вегетационного опыта // Экологический вестник Московского региона. 2003. № 2. С. 91–95.

19. Галиулин Р.В., Галиулина Р.А. Особенности фитоэкстракции тяжёлых металлов из загрязнённых почв // Агрохимия. 2010. № 11. С. 80–84.

20. Коротченко И.С., Львова В.А. Миграция кадмия и никеля в растениях-фиторемедиантах // Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований. 2015. № 11. Часть 2. С. 251–254.

References

1. Chekushina E.V. Monitoring of landfills and landfills // Tverdye bytovye otkhody. 2006. No. 11. P. 10–11 (in Russian).

2. Information issue “On the state of natural resources and the environment of the Moscow Region in 2020” [Internet resource] <https://mep.mosreg.ru/download/document/10132535> (Accessed: 19.01.22) (in Russian).

3. List of landfills in Moscow and the Moscow Region [Internet resource] <https://musoreco.ru/problems/svalki-musora.htm> (Accessed: 12.10.21) (in Russian).

4. Jimura K., Jto H., Chino M., Morishitaa T., Hirata H. Behavior of contaminants heavy metals in soil plant system // Proc. Inst. Sem. SEF MIA. Tokyo, 1977. 357 p.

5. Mosina L.V., Chupakina G.N., Maslennikov P.V., Zhandarova J.A., Dovletyarova E.A. Municipal solid waste landfills as a source of mycotoxins contamination in soil // IOP Conference Series Earth and Environmental Science. 2020. V. 548. No. 2. Article No. 022063. doi: 10.1088/1755-1315/548/2/022063

6. Koptsik G.N. Problems and prospects of phytoremediation of soils contaminated with heavy metals (literature review) // Soil Science. 2014. No. 9. P. 1113–1130 (in Russian). doi: 10.7868/S0032180X1409007X

7. Kireeva N.A., Grigoriadi A.S., Bagautdinov F.Ya. Phytoremediation as a method of purification of soils contaminated with heavy metals // Theoretical and Applied Ecology. 2011. No. 3. P. 4–10 (in Russian). doi: 10.25750/1995-4301-2011-3-004-010

8. Yankevich M.I., Khadeeva V.V., Murygina V.P. Bioremediation of soils: yesterday, today, tomorrow // Biosfera. 2015. V. 7. No. 2. P. 199–208 (in Russian).

9. Khuzhzhiev S.O., Bahramov I.Z., Sayfullaev A.F. Phytoremediation of soils contaminated with heavy metals // Estestvennye nauki. 2022. No. 2 (7). P. 37–45 (in Russian). doi: 10.54398/1818507X_2022_2_37

10. Majugina Yu.G., Kuznetsov V.V., Shevyakova N.I. Plants of landfills of municipal waste disposal of megacities as promising species for phytoremediation // Fiziologiya rasteniy. 2008. V. 55. No. 3. P. 453–463 (in Russian).

11. Galiulin R.V., Galiulina R.A., Kochurov B.I. Phytoremediation of soils contaminated with heavy metals // Theoretical and Applied Ecology. 2009. No. 4. P. 71–75 (in Russian). doi: 10.25750/1995-4301-2009-4-071-075

12. Lindiman A.V., Shvedova L.V., Tukumova N.V., Nevsky A.V. Phytoremediation of soils containing heavy metals // Ekologiya i promyshlennost Rossii. 2008. No. 9. P. 45–47 (in Russian).

13. Zabolotskikh V.V., Vasiliev A.V., Tankikh S.N., Karpovich E.E. Experimental studies of the effectiveness of phytoremediation of soils contaminated with oil, petroleum products and heavy metals // Akademicheskij vestnik ELPIT. 2020. V. 5. No. 2 (12). P. 25–47 (in Russian).

14. Gladkov E.A., Gladkova O.V. Ecobiogotехнологical approaches for increasing the coefficient of biological

absorption of plants in phytoremediation // Proceedings of Tula State University. Earth Sciences. 2019. No. 4. P. 32–40 (in Russian).

15. Olshanskaya L.N., Sobgaida N.A., Valiev R.S. Influence of the energy of external physical fields on the kinetics and mechanism of phytoremediation of metal ions from polluted effluents // *Ekologiya i promyshlennost Rossii*. 2014. No. 1. P. 13–17 (in Russian).

16. Zyrin N.G., Obukhov A.I., Kovnatsky E.F., Roslyakov N.N. Instrumental methods in ecological monitoring of the pedosphere // *Issues of environmental pollution control*. Leningrad: Hydrometeoizdat, 1981. P. 144–150 (in Russian).

17. Sirazhdinov R.Zh., Kukhtin P.V., Levov A.A., Morozov V.Yu., Semkina O.S. Management in urban economy. Moskva: KnoRus Company, 2009. 352 p. (in Russian).

18. Postnikov D.A., Kuznetsov S.V. Accumulation of heavy metals by white mustard plants in the conditions of vegetation experience // *Ecological Bulletin of the Moscow Region*. 2003. No. 2. P. 91–95 (in Russian).

19. Galiulin R.V., Galiulina R.A. Features of phytoextraction of heavy metals from polluted soils // *Agrokhi-miya*. 2010. No. 11. P. 80–84 (in Russian).

20. Korotchenko I.S., Lvova V.A. Migration of cadmium and nickel in phytoremediant plants // *Mezhdunarodnyy zhurnal prikladnykh i fundamentalnykh issledovaniy*. 2015. No. 11. Part 2. P. 251–254 (in Russian).

Фиторемедиационный потенциал иван-чая узколистного и канареечника тростниковидного в условиях полиэлементного загрязнения

© 2023. Л. М. Шапошникова, к. б. н., н. с.,
О. В. Раскоша, к. б. н., зав. отделом,
Н. Г. Рачкова, к. б. н., зав. лабораторией,
Институт биологии Коми научного центра Уральского отделения
Российской академии наук,
167982, Россия, г. Сыктывкар, ул. Коммунистическая, д. 28,
e-mail: shaposhnikova.l.m@ib.komisc.ru

Исследовано содержание более 20 химических элементов, включая естественные радионуклиды (U, ^{226}Ra), а также некоторые эссенциальные и потенциально токсичные элементы в аллювиально-дерновой почве на территории бывшего радиевого промысла (Республика Коми), загрязнённой в результате разлива на поверхность почвы отработанных высокоминерализованных пластовых вод. На примере канареечника тростниковидного и иван-чая узколистного изучено накопление этих химических элементов в растениях. Подтверждено, что их содержание в почве повышено по сравнению с соответствующими фоновыми уровнями, а интенсивным переходом из корневой части растений в надземную биомассу отличаются эссенциальные элементы К, Р, Mg и Са. В значимых количествах и в надземной, и в подземных частях растений определяются Zn, Mn и Cu. Токсичные и потенциально токсичные химические элементы преимущественно аккумулярованы в корневой системе, что является механизмом сдерживания для поступления поллютантов в надземную часть растений и способствует стабилизации их состояния в почве исследуемой зоны загрязнения.

Ключевые слова: пластовые высокоминерализованные воды, почва, уран, радий, элементный состав, *Phalaris arundinacea*, *Chamaenerion angustifolium*, фиторемедиация.

Phytoremediation potential of willow herb and reed canary grass under conditions of polyelemental pollution

© 2023. L. M. Shaposhnikova ORCID: 0000-0002-4181-4903
O. V. Raskosha ORCID: 0000-0003-4104-1717
N. G. Rachkova ORCID: 0000-0002-7966-7945
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: shaposhnikova.l.m@ib.komisc.ru

We investigated elemental composition of alluvial-sod soil, which was polluted by spilling radium enriched highly mineralized ground waters (Komi Republic) in 1930–1950s. It was revealed that content of more than 20 chemical elements, including U and ^{226}Ra , some essential and potentially toxic elements, was higher compared to uncontaminated background. Accumulation of these elements in canary grass (*Phalaris arundinacea* L.) and willow herb (*Chamaenerion angustifolium* L.) Scop.) was estimated by bioconcentration factor (BCF) equal to the ratio of the concentrations of chemical elements in the aboveground parts of plants and soils, as well as root barrier factor (RBF), equal to the ratio of the concentration of elements in the underground and aboveground parts of plants. The highest BCFs were more than 11 for potassium in both species and 3.7 and 10.5 for phosphorus in canary grass and willow herb, respectively. BCF for copper in both cases were close to 1. BCFs for Mg, Ca, Zn, Na, Mn and Sr ranged from 0.06 to 0.37. The minimal BCFs (< 0.03) were observed in the case of ^{226}Ra for canary grass and U, Fe, Ba, V, Al, and Pb for both plant species. Transfer from roots to aboveground parts of plants was highest for essential elements K, P, Mg, and Ca (RBF < 1). RBFs of Zn and Cu were < 1 in case of willow herb and > 1 for canary grass. Roots of both plant species accumulated U, ^{226}Ra , Pb, V, As, Al, Fe, Na, Ba, and Sr in higher concentrations than aboveground parts. The obtained data suggests that both plants contribute to decrease in bioavailability of pollutants due to root barrier that reduces the migration of potentially toxic elements from soil to plants and can be potential phytostabilizers for these pollutants. In the case of canary grass, root barrier function observed to greater extent.

Keywords: highly mineralized ground water, uranium, radium, soil, elemental composition, *Phalaris arundinacea*, *Chamaenerion angustifolium*, phytoremediation.

Пластовые высокоминерализованные воды являются источником загрязнения окружающей среды, способным выносить на поверхность почвы множество химических элементов, в число которых входят потенциально опасные тяжёлые металлы и радионуклиды в количествах, не характерных для поверхностных слоёв почвы [1, 2]. В Республике Коми подобные загрязнения появились в 1930–1950 гг. в результате деятельности радиохимических заводов по производству радия, который добывали из подземных высокоминерализованных вод. По химическому составу они относились к бессульфатным хлоридно-натриево-кальциевым рассолам, богатым Na, K, Li, Ca, Ba, Mg, Sr, Fe, Al, Mn, Cl [3]. Вследствие разлива на поверхности почвы оработанных на производстве пластовых вод образовались участки с полиэлементным загрязнением, на которых радиоактивный фон был повышен.

Со временем попавшие на поверхность химические элементы вовлекались в биогенный обмен [4–7]. Растениям в нём принадлежит важная роль, так как они являются ключевым звеном пищевых цепей. Эта роль особо значима в условиях, когда в круговорот включается избыточное количество токсикантов и определяется такими факторами, как концентрации элементов в надземных и подземных органах растений, количество биомассы и скорость её минерализации [4]. Также благодаря аккумулярующим свойствам растения могут способствовать очищению почв, что явилось основанием для разработки различных фиторемедиационных технологий восстановления загрязнённых и нарушенных территорий [8].

Цель нашей работы состояла в изучении элементного состава почвы, загрязнённой вследствие разлива оработанных высокоминерализованных вод с повышенным содержанием радия, а также аккумулярующей способности некоторых видов растений в отношении этих химических элементов для оценки их фиторемедиационного потенциала.

Объекты и методы исследования

Работы проводили в 2018–2019 гг. Исследуемый участок расположен в пойме р. Ухта на аллювиально-дерновой почве. Его растительный покров сформирован разнотравно-злаковым сообществом. Загрязнение участка обусловлено сбросом на поверхность почвы оработанных пластовых вод после добычи из них радия. В качестве

контрольной площадки был выбран участок, расположенный в 15 км выше по течению р. Ухта от загрязнённого, со сходным типом почвы и флористическим составом.

Для определения элементного состава отбирали образцы почвы из верхнего (0–20 см) слоя. Всего отобрано 27 образцов почвы на загрязнённом участке и 9 образцов на контрольном участке. Для изучения аккумулярующей способности и фиторемедиационного потенциала были выбраны два вида крупных многолетних дикорастущих растения с развитой корневой системой, произрастающих в зоне загрязнения. Это представитель семейства кипрейных (Onagraceae) иван-чай узколистный *Chamaenerion angustifolium* (L.) Scop. и злак канареечник тростниковидный *Phalaris arundinacea* L. Последний часто используется в исследованиях по биоиндикации и фитодезактивации почв [9, 10]. По три образца каждого вида растения выкапывали вместе с корнями, отделяли надземную часть, подземную часть очищали от почвы и промывали водой. Перед химическим анализом обе части растений высушивали на воздухе и измельчали на мельнице. Пробы почвы высушивали и просеивали через сито 1 мм. Аккумулярующую способность растений в отношении химических элементов оценивали по двум показателям – коэффициенту накопления (КН), равному отношению концентраций химических элементов в надземной части растения и почве, и коэффициенту корневого барьера ($K_{\text{кб}}$), равному отношению концентраций химических элементов в корневой и надземной части растений.

Массовую долю нерадиоактивных химических элементов в объектах исследования определяли на атомно-эмиссионном спектрометре с индуктивно-связанной плазмой (ICP-MS, Spectro Ciros^{CCD}, Germany) в экоаналитической лаборатории ИБ ФИЦ Коми НЦ УрО РАН. Содержание радионуклидов ²²⁶Ra и U анализировали радиохимическими методами из предварительно озолённых при 450 °C образцов в Лаборатории миграции радионуклидов и радиохимии ИБ ФИЦ Коми НЦ УрО РАН на приборах «Альфа-1» и «ЛЮФ-57» соответственно. Все измерения проводили в трёхкратной повторности. Различия между группами данных оценивали с помощью однофакторного дисперсионного анализа (ANOVA). Зависимости между содержанием химических элементов в почвах оценивали с помощью корреляционного анализа (Statistica, version 13.3).

Результаты и обсуждение

Концентрации ^{226}Ra в озолённых образцах почв загрязнённого участка составили 1,36–74,5 Бк/г. Это превышало показатели, соответствующие почве контрольного участка, в которой среднее содержание радионуклида отвечало уровню $40,6 \pm 10,8$ мБк/г. Концентрации урана в загрязнённой почве находились в пределах диапазона 0,86–3,69 мкг/г при среднем фоновом содержании $1,01 \pm 0,03$ мкг/г. Концентрации других химических элементов в образцах загрязнённых почв, в сравнении с контрольным участком, были также достоверно выше (ANOVA, $p < 0,05$) (табл. 1).

Наибольшее превышение фоновых показателей было характерно для содержания щелочноземельных элементов Ca, Ba и Sr – около 12, 50 и 88 крат соответственно, по Mg – в 5 раз. Так же как и в случае с ^{226}Ra , для этих элементов был характерен широкий диапазон варьиро-

вания. Являясь химическими аналогами, они сходны по интенсивности миграции в водных средах, и это обуславливает включение радия в процессы распределения макроэлементов в абиотических и биотических компонентах [11, 12]. Так, наблюдалась корреляция между содержаниями в почвенных образцах ^{226}Ra и Ba ($r = 0,59, p \leq 0,05$), ^{226}Ra и Sr ($0,74, p \leq 0,05$). Достоверной корреляции между содержанием ^{226}Ra и Ca, ^{226}Ra и Mg получено не было, но в то же время между содержанием Ca и Mg корреляция была тесной ($0,82, p \leq 0,05$).

Кратность превышения концентрации других элементов в почве загрязнённого участка по отношению к контролю составила от 1,5 до 5,9. Минимальным содержанием в почвах исследуемой территории характеризовались Cd и Se, хотя по сравнению с контрольными значениями их концентрации также были выше. Многие микроэлементы являются потенциально токсичными для живых организмов,

Таблица 1 / Table 1
Элементный состав почв загрязнённого и контрольного участков
Elemental composition of soils of contaminated and control sites

Химический элемент Chemical element	Содержание ($x \pm Sd$), мг/кг / Content ($x \pm Sd$), mg/kg	
	загрязнённый участок contaminated site	контрольный участок control site
Fe	25000±7000	8100±2200
Ca	20000±6000	1700±500
Al	11300±2900	6500±1700
Mg	6600±2000	1300±400
Ba	2100±900	41±12
K	2100±800	1100±500
Mn	990±290	290±90
S	960±290	190±60
Sr	800±130	9,0±2,6
P	740±220	510±150
Na	200±80	34±13
Zn	125±25	30±6
V	50±12	15,5±3,8
Ni	22±8	6,5±2,3
Cu	20±4	4,4±0,9
Cr	15,5±3,0	10,0±2,0
Pb	10,2±2,6	6,2±1,6
Co	8,2±3,2	3,4±1,4
As	6,6±3,3	1,7±0,9
Cd	0,77±0,37	0,15±0,08
Se	0,36±0,15	–

Примечание: x – среднее значение, Sd – стандартное отклонение, «–» – нет данных.
Note: x – mean value, Sd – standart deviation, “–” – no data.

если их концентрация в почве превышает допустимые уровни. К таковым относятся металлы (Cd, Co, Cr, Cu, Fe, Hg, Mn, Mo, Ni, Pb, Sn, V и Zn), некоторые металлоиды (As, Sb) и неметаллы (Se) [13]. Валовые концентрации некоторых из них в исследуемой почве превышали установленные предельно допустимые концентрации (ПДК) [14]. Так, концентрация As варьировали в диапазоне от 1 до 4 ПДК, Cu – 3–13 ПДК, Zn – 2–12 ПДК, Ni – 3–8 ПДК, Co – 1–3 ПДК, Cr – 1–5 ПДК. В то же время концентрации свинца, ванадия и марганца не превышали предельно допустимых значений и находились в пределах 0,2–0,5 ПДК, 0,2–0,6 ПДК и 0,2–1,2 ПДК соответственно. Таким образом, полученные данные свидетельствуют об изменении состава геохимической среды вследствие поступления отработанных минерализованных вод на поверхность почвы. Это выражено не только в повышении содержания в ней целого ряда химических элементов по сравнению с фоновыми значениями, но и, в некоторых случаях, в превышении их предельно допустимых, установленных нормативами, концентраций [14].

Согласно полученным данным, растения из зоны загрязнения в разной степени накапливали и радионуклиды, и нерадиоактивные элементы. Иван-чай узколистый, в сравнении с канареечником тростниковидным, отличался более высоким поглощением радия-226 (табл. 2, 3). Значения КН для иван-чая и канареечника составили 0,22 и 0,02 соответственно.

Более высокое поглощение в случае иван-чая наблюдалось и для других щелочноземельных элементов. Исключение составил барий, КН которого для этих двух видов растений не отличались. В то же время, по урану значимых различий для этих показателей зафиксировано не было ($KH_U = 0,01$ и $0,03$ соответственно).

В целом, закономерности накопления химических элементов растениями обоих видов были сходны. Самые высокие КН мы наблюдали для калия и фосфора. Следующей в этом ряду была медь, её КН были близки к 1. Такие элементы как Mg, Ca, Zn, Na, Mn и Sr накапливались в меньшей степени. Их значения КН находились в пределах от 0,06 до 0,37. Минимальные КН (до 0,03) отмечали для Fe, Ba, V, Al и Pb.

Известно, что химические элементы накапливаются в вегетативных органах по-разному [9, 10]. Некоторые из них аккумулируются преимущественно корнями растений, другие поступают в надземную массу [4, 15]. На этих свойствах растений основаны два разных метода фиторемедиации загрязнённых территорий. Растения потенциально могут использоваться в качестве фитоэкстрагентов для удаления загрязнителей из почвы путём их концентрирования в надземной массе, либо фитостабилизаторов – для стабилизации состояния металлов в почвах посредством сорбции корнями, осаждения, комплексообразования или снижения их подвижности в ризосфере [8]. Согласно полученным данным,

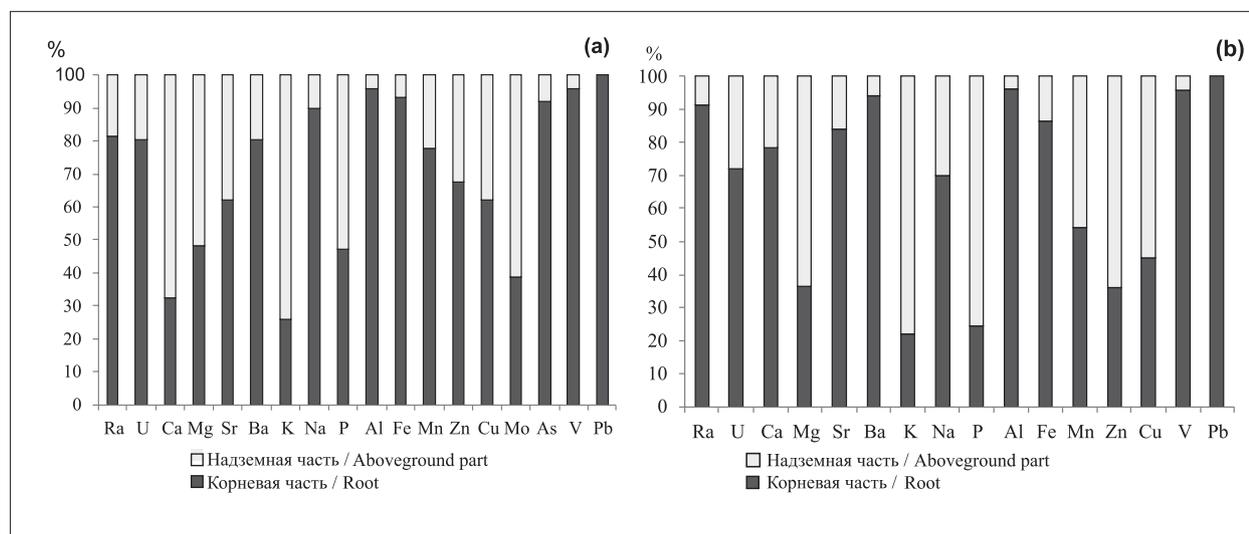


Рис. Относительное содержание радионуклидов и других химических элементов в подземной и надземной частях канареечника тростниковидного (а) и иван-чая узколистого (б).

Содержание Pb в подземной части приняли за 100%, так как его концентрация в надземной биомассе была ниже предела обнаружения

Fig. The ratio of concentrations of radionuclides and microelements in the underground and aboveground parts of the *P. arundinacea* (a) and *C. angustifolium* (b). Pb content in the roots was taken as 100%, since its concentration in the aboveground biomass was below detection limit

в распределении различных элементов между надземными и подземными частями растений наблюдались как сходные признаки, так и различия (рис.).

Интенсивным переходом из корневой части в надземную ($K_{\text{кб}} < 1$) отличались кальций, магний, фосфор и калий (табл. 2, 3). При этом, если распределение магния в канареечнике было равномерным, то в зелёной массе иван-чая его содержание было в 1,8 раз больше, чем в корневой части. Концентрация кальция в надземной части иван-чая была в 1,5 раза выше, чем в канареечнике. При этом значение $K_{\text{кб}}$ для иван-чая также превышало соответствующее значение для канареечника. Анализ данных указывает на то, что кальций содержится в высоких концентрациях и в подземной, и в надземной частях иван-чая узколистного. В целом, из всех щелочноземельных элементов, кальций и магний наиболее интенсивно переходят в фитомассу, что, безусловно, связано с их активной физиологической и биохимической ролью в организме растения [16]. Значительный переход в надземную часть растений наблюдался и для других жизненно важных элементов. В частности, из всех исследованных химических элементов $K_{\text{кб}}$ калия были наиболее

низкими – 0,34 и 0,28 для канареечника и иван-чая соответственно (табл. 2). Фосфор в обоих видах растений также имел $K_{\text{кб}} < 1$.

Такие элементы как Cu, Fe, Mn, Mo, Ni и Zn при низких концентрациях незаменимы, но при высоких содержаниях являются потенциально токсичными для растений [13, 17]. Наши исследования показали, что как в подземной, так и в надземной частях растений **Zn, Mn и Cu обнаруживаются в значимых количествах** (рис.). Однако их переход в надземную часть иван-чая узколистного происходит интенсивнее, чем у канареечника (табл. 2 и 3).

Полученные данные свидетельствуют, что многие химические элементы, поступая в растения, способны концентрироваться в их подземных частях. Так, во всех случаях содержание радионуклидов U и ^{226}Ra в корнях было выше, чем в надземной биомассе (ANOVA, $p \leq 0,05$). Среди нерадиоактивных химических элементов преимущественно корневое накопление имели Pb, V, As, Al, Fe, Na, Ba и Sr (табл. 2 и 3). Наиболее высокие коэффициенты корневого барьера были характерны для ванадия (около 22), мышьяка (11), алюминия (23–25). Значения $K_{\text{кб}}$ бария составили 4,12 в случае иван-чая и 23,7 – в случае канареечника. Для

Таблица 2 / Table 2

Элементный состав и характеристики биопоглощения у канареечника тростниковидного
Elemental composition and characteristics of bioabsorption in *Phalaris arundinacea*

Химический элемент Chemical element	Содержание ($x \pm Sd$) / Content ($x \pm Sd$)		F	p	KH BCF	$K_{\text{кб}}$ RBF
	надземная часть aboveground part	подземная часть underground part				
^{226}Ra	0,04±0,02	0,19±0,01	41,1	0,003	0,02	4,75
U	0,020±0,007	0,06±0,01	33,3	0,004	0,01	3,00
Ca	7100±1700	3400±600	34,3	0,004	0,35	0,48
Mg	1400±100	1300±100	3,00	0,158	0,21	0,93
Sr	58±14	95±23	5,54	0,078	0,06	1,64
Ba	36±7	150±40	20,7	0,010	0,02	4,12
K	23700±1200	8300±600	407	0,00004	11,5	0,34
Na	61±24	550±210	16,1	0,016	0,31	8,97
P	2700±100	2400±900	0,34	0,592	3,66	0,89
Al	220±130	5100±700	143,7	0,0003	0,02	23,2
Fe	470±290	6600±500	377,8	0,00004	0,02	13,9
Mn	140±50	470±200	7,75	0,049	0,14	3,48
Zn	46±15	95±12	20,1	0,011	0,37	2,09
Cu	20±9	32±12	1,16	0,342	0,99	1,63
As	0,17±0,08	1,90±0,26	74,2	0,003	0,03	11,2
V	0,95±0,36	21,3±3,2	117,0	0,0004	0,02	22,4

Примечание (здесь и в табл. 3): содержание ^{226}Ra приведено в Бк/г, U – в мкг/г, остальных элементов – в мг/кг; «–» – нет данных, x – среднее значение, Sd – стандартное отклонение, F и p – критическое значение критерия Фишера и уровень значимости (ANOVA), $df = 1$; KH – коэффициент накопления, $K_{\text{кб}}$ – коэффициент корневого барьера.

Note (here and Table 3): content of ^{226}Ra is given in Bq/g, U – $\mu\text{g/g}$, other elements – mg/kg; “–” – no data, x – mean value, Sd – standart deviation, F and p – critical value of the Fisher criterion and significance level (ANOVA), $df = 1$; BCF – bioconcentration factor, RBF – root barrier factor.

Таблица 3 / Table 3

Элементный состав и характеристики биопоглощения у иван-чая узколистного
Elemental composition and characteristics of bioabsorption in *Chamaenerion angustifolium*

Химический элемент Chemical element	Содержание ($x \pm Sd$) / Content ($x \pm Sd$)		F	p	КН BCF	$K_{кб}$ RBF
	надземная часть aboveground part	подземная часть underground part				
^{226}Ra	0,10±0,02	0,52±0,16	7,37	0,049	0,22	5,20
U	0,050±0,006	0,08±0,007	13,5	0,021	0,03	1,60
Ca	10300±1200	40000±15000	12,4	0,024	0,51	3,87
Mg	4300±900	2500±500	9,99	0,034	0,66	0,57
Sr	111±34	610±260	10,4	0,032	0,12	5,47
Ba	32±15	760±260	50,7	0,005	0,02	23,7
K	24000±6000	6800±2500	8,36	0,044	11,8	0,28
Na	65±31	150±26	13,2	0,022	0,33	2,31
P	7700±1700	2400±240	9,98	0,032	10,5	0,31
Al	71±30	1770±250	131,0	0,0003	0,01	24,9
Fe	580±110	2700±1400	5,48	0,079	0,02	4,68
Mn	70±22	82±12	0,67	0,459	0,07	1,17
Zn	57±14	31,3±2,9	8,73	0,048	0,45	0,55
Cu	14,7±2,1	11,9±0,8	4,51	0,101	0,73	0,81
V	0,56±0,18	12,5±2,8	54,6	0,002	0,01	22,3

многих потенциально опасных химических элементов корни выступают в качестве барьера для перехода в зелёную массу растений. Особое значение это имеет в случае элементов, таких как As и Pb, токсичных даже в следовых количествах [13, 17]. Накопление в корневой части позволяет существенно снизить их подвижность и биологическую доступность. Заметим, что свинец в значительных количествах обнаруживался только в этой части растений (рис.), в то время как в надземных частях его концентрации были ниже предела обнаружения. Это согласуется с данными литературы, касающимися другого распространённого злака – полевицы тонкой (*Argostis tenuis* Sibth.) [4].

Несмотря на общность признаков распределения радионуклидов и потенциально токсичных химических элементов в растениях обоих видов, содержание Cu, Al, Fe, Mn, Zn, V, Pb в корнях канареечника были в 1,7–5,7 раз выше в сравнении с иван-чаем, при этом переход Cu, Mn, Zn из корневой в надземную часть иван-чая происходил интенсивней, на что указывают их $K_{кб}$. Таким образом, корни канареечника тростниковидного более эффективно выполняли барьерные функции в отношении потенциально токсичных элементов по сравнению с корневой системой иван-чая. В литературе имеются данные, что в корневой части канареечника тростниковидного хорошо накапливаются и другие металлы, такие как Co и Cd, в связи с чем авторы делают заключение

о хороших фитостабилизирующих свойствах этого растения в отношении этих металлов [9]. В целом, анализ полученных данных позволяет предположить, что оба растения – и канареечник, и иван-чай вносят вклад в снижение подвижности и биологической доступности поллютантов в исследуемой загрязнённой экосистеме. Однако в случае канареечника тростниковидного механизмы этих процессов теснее связаны с барьерной функцией корней растения.

Заключение

Представленные результаты свидетельствуют о существенном влиянии бывшего радиодобывающего предприятия в Республике Коми на окружающую биогеохимическую среду. Локальный разлив отработанных на производстве высокоминерализованных пластовых вод, содержащих радионуклиды, сопровождался не только увеличением в почве их содержания, но и повышением концентрации целого ряда нерадиоактивных, в том числе потенциально токсичных, элементов, впоследствии активно вовлекающихся в биогенный обмен. На примере канареечника тростниковидного и иван-чая узколистного показано, что в высоких концентрациях в растениях накапливаются эссенциальные элементы, такие как K, P, Mg, Ca. Экспериментально подтверждено, что большая часть исследованных

химических элементов (U, ²²⁶Ra, Pb, V, As, Al, Fe, Na, Ba, Sr) аккумулируется в подземной части растений. В основном, это элементы, которые являются токсичными или потенциально токсичными для растений. Полученные результаты указывают, что исследуемые виды растений являются потенциальными фитостабилизаторами для подобных полиэлементных загрязнений.

Работа выполнена при финансовой поддержке госбюджетной темы отдела радиоэкологии Института биологии ФИЦ Коми НЦ УрО РАН № 122040600024-5 при частичной поддержке гранта РФФИ и Правительства Республики Коми № 20-45-110009р_а.

Литература

1. Самтанова Д.Э., Сангаджиева Л.Х. Влияние минерализованных пластовых вод на загрязнение почвенного покрова // Известия Саратовского университета. Новая серия. Серия Химия. Биология. Экология. 2013. Т. 13. № 2. С. 96–101.

2. Bzowski Z., Michalik B. Mineral composition and heavy metal contamination of sediments originating from radium rich formation water // Chemosphere. 2015. V. 122. P. 79–87.

3. Евсеева Т.И., Таскаев А.И., Кичигин А.И. Водный промысел. Сыктывкар: Издательство Коми НЦ УрО РАН, 2000. 39 с.

4. Безель В.С., Жуикова Т.В. Химическое загрязнение среды: вынос химических элементов надземной фитомассой травянистой растительности // Экология. 2007. Т. 38. № 4. С. 259–267.

5. Minkina T.M., Mandzhieva S.S., Chaplygin V.A., Bauer T.V., Burachevskaya M.V., Nevidomskaya D.G., Sushkova S.N., Sherstnev A.K., Zamulina I.V. Content and distribution of heavy metals in herbaceous plants under the effect of industrial aerosol emissions // Journal of Geochemical Exploration. 2017. V. 174. P. 113–120.

6. Briffa J., Sinagra E., Blundell R. Heavy metal pollution in the environment and their toxicological effects on humans // Heliyon. 2020. V. 6. No. 9. Article No e04691.

7. Shtangeeva I., Viksna A., Bertins M., Ryumin A., Grebnevs V. Variations in the concentrations of macro- and trace elements in two grasses and in the rhizosphere soil during a day // Environmental Pollution. 2020. V. 262. Article No. 114265.

8. Ali H., Khan E., Sajad M.A. Phytoremediation of heavy metals – concepts and applications // Chemosphere. 2013. V. 91. P. 869–881.

9. Polechonska L., Klink A. Trace metal bioindication and phytoremediation potentialities of *Phalaris arundinacea* L. (reed canary grass) // Journal of Geochemical Exploration. 2014. V. 146. P. 27–33.

10. Brezinova T., Vymazal J. Evaluation of heavy metals seasonal accumulation in *Phalaris arundinacea* in a constructed treatment wetland // Ecological Engineering. 2015. V. 79. P. 94–99.

11. Рачкова Н.Г., Раскоша О.В. Последствия поступления урана и радия-226 в организмы растений и животных на территории складирования отходов радиевого промысла // Теоретическая и прикладная экология. 2020. № 3. С. 188–195.

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

13. Antoniadis V., Shaheen S.M., Stark H.-J., Wennrich R., Levizou E., Merbach I., Rinklebe J. Phytoremediation potential of twelve wild plant species for toxic elements in a contaminated soil // Environment International. 2021. V. 146. Article No. 106233.

14. Предельно допустимые концентрации (ПДК) химических веществ в почве: Гигиенические нормативы. М.: Федеральный центр гигиены и эпидемиологии Роспотребнадзора, 2006. 15 с.

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

16. Ермаков В.В., Тютиков С.Ф. Геохимическая экология животных. М.: Наука, 2008. 315 с.

17. Palansooriyaa K.N., Shaheen S.M., Chene S.S., Tsange D.C.W., Hashimoto Y., Houg D., Bolanh N.S., Rinklebe J., Oka Y.S. Soil amendments for immobilization of potentially toxic elements in contaminated soils: A critical review // Environment International. 2020. V. 134. Article No. 105046.

References

1. Samtanova D.E., Sangadzhieva L.H. Influence of the mineralized stratal waters on contamination of soil cover // Izvestiya Saratovskogo universiteta. Novaya seriya. Seriya Khimiya. Biologiya. Ekologiya. 2013. V. 13. No. 2. P. 96–101 (in Russian).

2. Bzowski Z., Michalik B. Mineral composition and heavy metal contamination of sediments originating from radium rich formation water // Chemosphere. 2015. V. 122. P. 79–87. doi: 10.1016/j.chemosphere.2014.10.077

3. Evseeva T.I., Taskaev A.I., Kichigin A.I. Vodnyy promysel. Syktyvkar: Izdatelstvo Komi NTs UrO RAN, 2000. 39 p. (in Russian).

4. Bezel V.S., Zhuikova T.V. Chemical pollution: transfer of chemical elements to the aboveground phytomass of herbaceous plants // Russian Journal of Ecology. 2007. V. 38. No. 4. P. 238–246.

5. Minkina T.M., Mandzhieva S.S., Chaplygin V. A., Bauer T.V., Burachevskaya M.V., Nevidomskaya D.G.,

Sushkova S.N., Sherstnev A.K., Zamulina I.V. Content and distribution of heavy metals in herbaceous plants under the effect of industrial aerosol emissions // Journal of Geochemical Exploration. 2017. V. 174. P. 113–120. doi: 10.1016/j.gexplo.2016.05.011

6. Briffa J., Sinagra E., Blundell R. Heavy metal pollution in the environment and their toxicological effects on humans // Heliyon. 2020. V. 6. No. 9. Article No. e04691. doi: 10.1016/j.heliyon.2020.e04691

7. Shtangeeva I., Viksna A., Bertins M., Ryumin A., Grebnevs V. Variations in the concentrations of macro- and trace elements in two grasses and in the rhizosphere soil during a day // Environmental Pollution. 2020. V. 262. Article No. 114265. doi: 10.1016/j.envpol.2020.114265

8. Ali H., Khan E., Sajad M.A. Phytoremediation of heavy metals – concepts and applications // Chemosphere. 2013. V. 91. P. 869–881.

9. Polechonska L., Klink A. Trace metal bioindication and phytoremediation potentialities of *Phalaris arundinacea* L. (reed canary grass) // Journal of Geochemical Exploration. 2014. V. 146. P. 27–33. doi: 10.1016/j.gexplo.2014.07.012

10. Brezinova T., Vymazal J. Evaluation of heavy metals seasonal accumulation in *Phalaris arundinacea* in a constructed treatment wetland // Ecological Engineering. 2015. V. 79. P. 94–99. doi: 10.1016/j.ecoleng.2015.04.008

11. Rachkova N.G., Raskosha O.V. Consequences of uranium and radium-226 entering into the organisms of plants and animals in territory of radioactive wastes storage // Theoretical and Applied Ecology. 2020. No. 3. P. 188–195 (in Russian). doi: 10.25750/1995-4301-2020-3-188-195

12. Chao J.H., Chuang C.Y. Accumulation of radium in relation to some chemical analogues in *Dicranopteris linearis* // Applied Radiation and Isotopes. 2011. V. 69. P. 261–267. doi: 10.1016/j.apradiso.2010.08.012

13. Antoniadis V., Shaheen S.M., Stark H.-J., Wernrich R., Levizou E., Merbach I., Rinklebe J. Phytoremediation potential of twelve wild plant species for toxic elements in a contaminated soil // Environment International. 2021. V. 146. Article No. 106233. doi: 10.1016/j.envint.2020.106233

14. Maximum permissible concentrations (MPC) of chemicals in the soil: Hygienic standards. Moskva: Federalnyy centr gigieny i epidemiologii Rospotrebnadzora, 2006. 15 p. (in Russian).

15. Hu N., Ding D., Li G., Zheng Ji., Li L., Zhao W., Wang Y. Vegetation composition and ²²⁶Ra uptake by native plant species at a uranium mill tailings impoundment in South China // Journal of Environmental Radioactivity. 2014. V. 129. P. 100–106. doi: 10.1016/j.jenvrad.2013.12.012

16. Ermakov V.V., Tyutikov S.F. Geochemical ecology of animals. Moskva: Nauka, 2008. 315 p (in Russian).

17. Palansooriyaa K.N., Shaheen S.M., Chene S.S., Tsang D.C.W., Hashimoto Y., Houg D., Bolan N.S., Rinklebe J., Oka Y.S. Soil amendments for immobilization of potentially toxic elements in contaminated soils: A critical review // Environment International. 2020. V. 134. Article No. 105046. doi: 10.1016/j.envint.2019.105046

Влияние промышленных выбросов предприятий теплоэнергетики на поглощение солнечного излучения в атмосфере

© 2023. В. А. Кузьмин, д. т. н., профессор, г. н. с.,
И. А. Заграй, к. т. н., с. н. с.,
Н. А. Шмакова, ст. преподаватель,
Вятский государственный университет,
610000, Россия, г. Киров, ул. Московская, д. 36,
e-mail: ZagrayIA@yandex.ru

В работе проведена оценка влияния выбросов предприятий теплоэнергетики на поглощение излучения в атмосфере через расчёт коэффициентов поглощения и функций поглощения продуктов сгорания при факельном сжигании твёрдых топлив (угля и торфа) в топке парового котла БКЗ-210-140Ф. На основании химического состава газовой фазы и частиц конденсированной фазы выполнены расчёты коэффициентов поглощения при температуре 300 К в спектральном интервале 0,4–14 мкм, а также функций поглощения при толщинах слоя 5 и 10 м. Наличие частиц золы вносит существенный вклад в поглощение солнечного излучения продуктами сгорания в окнах прозрачности газовой фазы. При отсутствии системы очистки дымовых газов для оптического диапазона (0,4–0,78 мкм) поглощение может составлять до 20% при сжигании угля и до 46% при сжигании торфа. В широком окне прозрачности атмосферы 7,5–14 мкм функция поглощения продуктов сгорания принимает значения от 73 до 100% при сжигании угля и от 64 до 100% при сжигании торфа. Наибольшая оптическая толщина по коэффициентам поглощения газовой фазы приходится на компоненты H_2O и CO_2 , которые вносят основной вклад в создание парникового эффекта.

Ключевые слова: атмосфера, парниковый эффект, факельное сжигание угля и торфа, продукты сгорания, газовая фаза, частицы золы, коэффициент поглощения, функция поглощения.

Influence of industrial emissions from heat power engineering enterprises on the absorption of solar radiation in the atmosphere

© 2023. V. A. Kuzmin ORCID: 0000-0001-9979-4610
I. A. Zagrai ORCID: 0000-0002-8886-8677
N. A. Shmakova ORCID: 0000-0002-7718-7681
Vyatka State University,
36, Moskovskaya St., Kirov, Russia, 610000,
e-mail: ZagrayIA@yandex.ru

The paper evaluates the effect of emissions from heat power engineering enterprises on the absorption of radiation in the atmosphere through the calculation of absorption coefficients and absorption functions of combustion products during flaring of solid fuels (coal and peat) in the furnace of BKZ-210-140F steam boiler. The chemical composition of the gas phase and condensed phase particles were used to calculate the absorption coefficients at a temperature of 300 K and the spectral range of 0.4–14 μm , as well as the absorption functions at layer thicknesses of 5 and 10 m. The presence of ash particles makes a significant contribution to the absorption of solar radiation by combustion products in the transparency windows of the gas phase. In the absence of a flue gas purification system for the optical range (0.4–0.78 μm), absorption can be up to 20% during flaring of coal and up to 46% during flaring of peat. For the atmospheric transparency window of 7.5–14 μm , the absorption function of combustion products takes values from 73 to 100% during flaring of coal and from 64 to 100% during flaring of peat. The largest optical thickness in terms of the absorption coefficients of gas phase is accounted for the components H_2O and CO_2 , which make the main contribution to the creation of the greenhouse effect.

Keywords: atmosphere, greenhouse effect, flaring of coal and peat, combustion products, gas phase, ash particles, absorption coefficient, absorption function.

Антропогенное воздействие на окружающую среду за последнее время стало настолько существенным, что даже в пределах одного поколения наблюдаются ощутимые изменения атмосферных и климатических условий. В докладе Межправительственной группы экспертов по изменению климата [1] утверждается, что с вероятностью 95% деятельность человека является основной причиной происходящего глобального потепления. Присутствие в атмосфере газов и аэрозолей (твёрдых и жидких частиц), создающих парниковый эффект, вызывает поглощение в атмосфере Земли теплового излучения, испускаемого суши и океаном, в результате чего количество уходящего в космос излучения оказывается меньшим, чем оно было бы в отсутствие поглотителей в атмосфере. Согласно работам [2, 3] чёрный углерод является основным поглотителем солнечного излучения в видимом диапазоне и представляет собой второй по значению фактор после CO_2 , оказывающий влияние на глобальное потепление.

По проведённым оценкам, на территории России потепление климата идёт со скоростью $0,51^\circ\text{C}$ за десятилетие, что более чем в 2,5 раза превышает среднюю скорость глобального потепления [4, 5]. В структуре выбросов парниковых газов в Российской Федерации доминирует энергетический сектор, доля которого в совокупном выбросе в 2019 г. составляла 78,7%. При этом количество выбросов парниковых газов в эквиваленте CO_2 составило 1,67 млрд т, из которых на долю CO_2 приходилось 89,3%, CH_4 – 10,3%, N_2O – 0,3% [4]. Изменение потребления ископаемых видов топлива (угля, торфа, нефти, природного газа) и продуктов их переработки в зависимости от сезона, тенденций развития экономики и других факторов оказывает влияние на величину промышленных выбросов предприятий теплоэнергетики.

Борьба с усилением парникового эффекта планируется всеми способами: снижение выбросов в атмосферу путём установления квот по выбросам и утилизация CO_2 карбоновыми фермами [6, 7]. Один гектар такой фермы способен поглощать от 30 до 60 т CO_2 за год. Одним из средств борьбы с выбросами CO_2 является учёт углеродного (карбонового) следа производимой продукции, т. е. расчёт количества выбросов CO_2 и других парниковых газов на единицу продукции [8]. На очередной конференции ООН по изменению климата (КС-26), проходившей в 2021 г. в г. Глазго, было отмечено, что сжигание углеродного топлива является

главной причиной накопления парниковых газов в атмосфере, а рост средней температуры на планете к 2100 г. может достигнуть $2,4$ – $2,7^\circ\text{C}$, что значительно превышает установленный безопасный предел в $1,5^\circ\text{C}$ [9].

Основные экономики мира, включая Россию, уже наметили план на пути к экологизации производства путём перехода на низкоуглеродные и энергосберегающие технологии в самых разных отраслях экономики. В рамках конференции КС-26 многие страны (Вьетнам, Польша, Чили и др.) приняли обязательство отказаться от ископаемого топлива. Однако страны, экономика которых напрямую зависит от использования угля, такие как Китай, США, Австралия, Индия и Россия, отказались от принятия подобных обязательств.

В России в целях реализации Указа Президента от 8 февраля 2021 г. № 76 «О мерах по реализации государственной научно-технической политики в области экологического развития Российской Федерации и климатических изменений» разработана Программа в области экологического развития и климатических изменений до 2030 г. Программа включает в себя три направления: 1) мониторинг и прогнозирование состояния окружающей среды и климата; 2) смягчение антропогенного воздействия на окружающую среду и климат; 3) адаптация природных систем, населения и отраслей экономики к изменениям климата.

Реализация Программы подразумевает получение и использование достоверных данных об окружающей среде и климатических изменениях, а также разработку комплекса технологических решений в направлении снижения выбросов загрязняющих веществ и парниковых газов и увеличения потенциала поглощения углерода экосистемами.

Целью настоящей работы является оценка влияния выбросов предприятий теплоэнергетики на поглощение солнечного излучения в атмосфере через расчёт коэффициентов поглощения и функций поглощения продуктов сгорания при факельном сжигании твёрдых топлив (угля и торфа) в топке парового котла БКЗ-210-140Ф.

Объекты и методы исследования

Объектами исследования являются гетерогенные продукты сгорания при факельном сжигании твёрдых топлив (угля и торфа). Моделирование коэффициентов погло-

щения чистой атмосферы и газовой фазы продуктов сгорания выполнено с помощью информационно-вычислительной системы «Спектроскопия атмосферных газов», расчёт коэффициентов поглощения конденсированной фазы продуктов сгорания произведён с применением разработанного на кафедре инженерной физики Вятского государственного университета программного комплекса по определению теплового излучения рабочих сред энергетических установок. Химический состав частиц конденсированной фазы найден методом рентгенофлуоресцентного анализа. Для исследования дисперсности частиц применяли метод электронно-сканирующей микроскопии.

Поглощение солнечного излучения чистой атмосферой. Посредством процессов рассеяния и поглощения атмосфера контролирует количество поступающего на Землю солнечного излучения и количество солнечного излучения, которое возвращается в космос. Благодаря оптическому возбуждению атмосферные газы поглощают солнечное излучение на определённых длинах волн. Озон, кислород и азот поглощают преимущественно в ультрафиолетовом диапазоне, а водяной пар – в ближнем инфракрасном диапазоне.

Водяной пар представляет собой наиболее мощный поглотитель коротковолнового излучения в ближнем ИК-диапазоне. Основные полосы поглощения H_2O находятся вблизи длин волн 1,1; 1,4; 1,9; 2,7; 6,3 мкм. Большая часть поглощения атмосферой происходит благодаря водяному пару, он вносит основной вклад в природный парниковый эффект [4].

Содержание CO_2 в сухом атмосферном воздухе невелико (до 0,045 об. %), но он является вторым по значимости парниковым газом

в атмосфере, поскольку поглощает и переизлучает инфракрасное излучение в различных полосах, центрами которых являются 1,9; 2,7; 4,3; 10,6 и 14 мкм.

В данной работе для расчётов использовали модель атмосферы Института оптики атмосферы СО АН СССР [10] для смеси воздуха в летний сезон на высоте $H = 0$ м и для условий средних широт. Состав атмосферы принимали следующим (в об. %): $H_2O - 1,56$, $CO_2 - 0,0333$, $O_3 - 0,000002$, $N_2O - 0,000028$, $CO - 0,000047$, $CH_4 - 0,000148$, $O_2 - 20,7$, $SO_2 - 0,000008$, $NH_3 - 0,000001$, $N_2 - 77,7$.

С помощью информационно-вычислительной системы «Спектроскопия атмосферных газов» (SPECTRA) (<http://spectra.iao.ru>), содержащей банки данных HITRAN, GEISA, HITEMP для газовых составляющих, произведён расчёт коэффициента поглощения атмосферы при температуре $T = 300$ К, давлении $p = 10^5$ Па в спектральном интервале $\lambda = 0,4 - 14$ мкм (рис. 1а). На рисунке 1б, с представлены функции поглощения атмосферы при толщинах слоя $x = 5$ и 10 м соответственно, которые также использованы для расчёта функций поглощения продуктов сгорания при факельном сжигании твёрдых топлив (угля и торфа).

Функцию поглощения атмосферы определяли по формуле:

$$A = 1 - \exp(-k \cdot x),$$

где k – коэффициент поглощения, $1/м$; x – толщина слоя, м.

Данная формула следует из закона Бугера и применима в случае однородной атмосферы и небольшой толщины слоя, в пределах

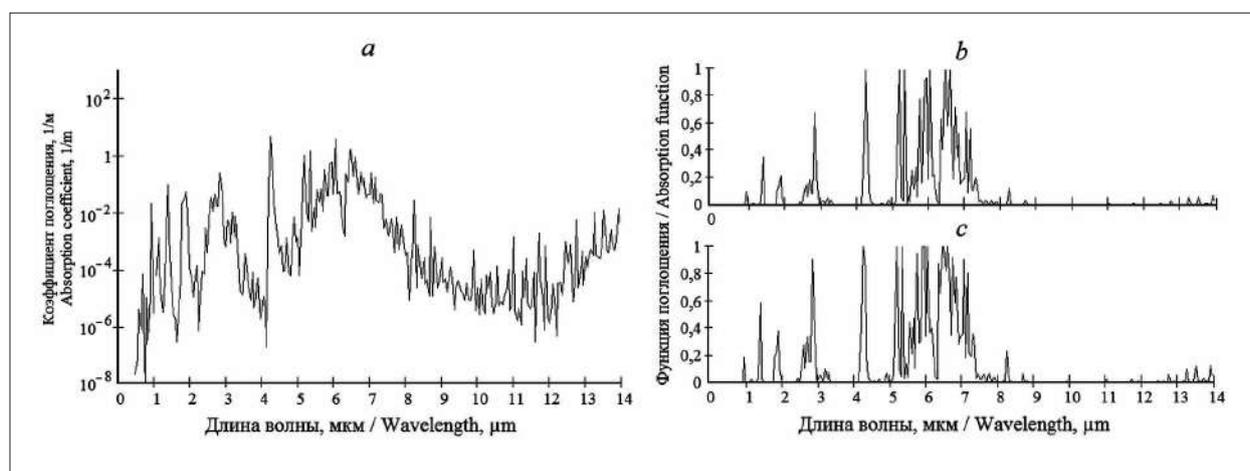


Рис. 1. Коэффициент поглощения (а) и функции поглощения (b, c) атмосферы
 Fig. 1. Absorption coefficient (a) and absorption functions (b, c) of atmosphere

которого давление и температура остаются постоянными. Коэффициент поглощения определяется свойствами вещества (в нашем случае атмосферы) и зависит от температуры, давления и длины волны поглощаемого света. В общем случае, коэффициент поглощения равен сумме коэффициентов поглощения отдельных компонентов атмосферы, таких как молекулы газа и аэрозоли. В данной работе не рассматриваются процессы поглощения на аэрозольных частицах и эффекты рассеяния солнечного излучения.

Согласно рисунку 1, атмосферное поглощение относительно невелико в следующих спектральных интервалах: в видимой области 0,4–0,78 мкм, в инфракрасной области спектра вблизи длин волн 1,1; 1,6; 2,2; 3,8; 4,6 мкм, а также в широком окне прозрачности 7,5–14 мкм [11]. Именно на это окно прозрачности приходится максимум теплового излучения при температурах атмосферы и земной поверхности. Оно способствует оттоку теплового излучения в мировое пространство и, как следствие, уменьшению действия парникового эффекта.

Определение коэффициентов поглощения и функций поглощения продуктов сгорания при сжигании твёрдых топлив. Многие крупные предприятия промышленной теплоэнергетики используют при выработке тепловой и электрической энергии твёрдые топлива различных месторождений, обычно уголь и торф. На Кировских ТЭЦ, помимо угля различных месторождений, используется местный вид топлива – торф. Постоянная смена топлив объясняется их стоимостью, логистическими затратами и близостью местных топливных ресурсов. За счёт местного торфа обеспечивается стабильность работы предприятий топливно-энергетического комплекса, формируется топливная независимость и энер-

гетическая безопасность региона на случай чрезвычайной ситуации. В качестве примера в таблице 1 приводятся характеристики угля Кузбасского бассейна и торфа месторождений Кировской области, используемых на Кировских ТЭЦ.

Постоянная смена видов топлива вынуждает настраивать работу котлоагрегатов на оптимальный режим. Из представленных характеристик угля и торфа следует, что уголь обладает большей зольностью, содержанием углерода и теплотворной способностью по сравнению с торфом. Из-за сравнительно низкой калорийности торф на Кировской ТЭЦ-4 сжигается в смеси с природным газом для обеспечения стабильности работы котла [13]. При факельном сжигании угля и торфа в топках котлов БКЗ-210-140Ф топочные газы представляют собой гетерогенные продукты сгорания, состоящие из газовой фазы (ГФ) и частиц конденсированной фазы (КФ) [13]. В общем случае ГФ состоит в основном из двух- и трёхатомных молекул CO₂, H₂O, NO₂, SO₂, CO, NO, N₂, O₂. Состав продуктов сгорания при сжигании торфа и угля рассчитывался по продуктам полного сгорания по методике [14]. Содержание компонентов ГФ при сжигании угля и торфа приведено в таблице 2. Из таблицы 2 следует, что отличие компонентов ГФ наблюдается только количественное.

Конденсированная фаза при сжигании твёрдых топлив представляет собой частицы золы, состоящие из оксидов различных элементов: SiO₂, Al₂O₃, Fe₂O₃, CaO, K₂O, MgO и т. д. [15]. Количественные показатели образующихся оксидов при сжигании угля и торфа приведены в таблице 3. Из представленных данных следует количественное отличие показателей. В данной работе рассчитывали спектральные коэффициенты поглощения

Таблица 1 / Table 1

Характеристики угля и торфа [12] / Coal and peat characteristics [12]

Наименование показателя / Parameter	Уголь / Coal	Торф / Peat
Содержание влаги W ^r , % / Moisture W ^r , %	12	51,8
Зольность A ^r , % / Ash content A ^r , %	15	6,3
Содержание серы S ^r , % / Sulfur S ^r , %	0,4	0,3
Содержание углерода C ^r , % / Carbon C ^r , %	57,1	24,3
Содержание водорода H ^r , % / Hydrogen H ^r , %	4,1	2,6
Содержание азота N ^r , % / Nitrogen N ^r , %	1,8	1,4
Содержание кислорода O ^r , % / Oxygen O ^r , %	9,6	13,3
Низшая теплота сгорания Q ^r , ккал/кг (кДж/кг)	3673	1933
Low combustion heat Q ^r , kcal/kg (kJ/kg)	(15378)	(8093)
Выход летучих V ^{daf} , % / Volatile matter content V ^{daf} , %	42	50

Таблица 2 / Table 2

Состав (в об. %) газовой фазы продуктов сгорания
Composition of the gas phase (vol. %) in combustion products

Компоненты / Composition	Уголь / Coal	Торф / Peat
CO ₂	14,074	11,55
H ₂ O	9,158	16,192
SO ₂	0,034	0,045
N ₂	73,486	68,578
O ₂	3,249	3,634

Таблица 3 / Table 3

Состав конденсированной фазы (в %) продуктов сгорания [12]
Composition of the condensed phase (%) in combustion products [12]

Компоненты / Composition	Уголь / Coal	Торф / Peat
SiO ₂	59,3	47,59
Al ₂ O ₃	21	18,96
Fe ₂ O ₃	5,7	20,84
CaO	5,3	4,88
K ₂ O	3,8	1,22
MgO	2,2	0,62
P ₂ O ₅	0,8	4,02
TiO ₂	0,9	0,45
Na ₂ O	–	0,38
SO ₃	–	0,55

Примечание: Прочерк означает отсутствие компонента.
Note: A dash means the absence of a component.



Рис. 2. Основные факторы, определяющие коэффициенты поглощения гетерогенных продуктов сгорания
Fig. 2. The main factors determining absorption coefficient of heterogeneous combustion products

компонентов ГФ и КФ для дымовых газов, выбрасываемых в атмосферу при сжигании угля и торфа в паровом котле БКЗ-210-140Ф. В общем случае коэффициенты поглощения ГФ и КФ зависят от разных факторов (рис. 2).

Коэффициенты поглощения ГФ $\alpha_{ГФ}$ при сжигании угля и торфа вычисляли методом полинейного счёта, где в качестве исходных данных использовали состав газовой смеси, температуру, давление и длину волны излучения. Коэффициенты поглощения КФ $\alpha_{КФ}$ определяли через числовую концентрацию и сечения поглощения полидисперсных систем сферических частиц по теории Ми [16].

Коэффициенты поглощения гетерогенных продуктов сгорания при сжигании твёрдых топлив определяли по формуле: $k = \alpha_{ГФ} + \alpha_{КФ}$ при $T = 300 \text{ К}$, $p = 10^5 \text{ Па}$ в спектральном интервале $\lambda = 0,4\text{--}14 \text{ мкм}$.

Функции поглощения A определялись при толщинах слоя $x = 5$ и 10 м , соответствующих концентрациям ГФ и КФ в случае безветренной погоды вблизи дымовой трубы предприятия.

Результаты и обсуждение

На рисунках 3 и 4 представлены значения коэффициента поглощения и функции поглощения продуктов сгорания при сжигании угля и торфа. Наличие частиц КФ вносит существенный вклад в поглощение солнечного излучения продуктами сгорания в окнах прозрачности ГФ.

С помощью технических устройств (фильтры, скрубберы и т. д.) удаётся очистить от большого числа зольных частиц дымовые

газы, выбрасываемые в атмосферу. При наихудшем сценарии (без системы очистки дымовых газов) все продукты сгорания из топки котла попадают в атмосферный воздух, создавая облако загрязняющих веществ. В этом случае для оптического диапазона (0,4–0,78 мкм) поглощение может составлять до 20% при сжигании угля и до 46% при сжигании торфа ($x = 10 \text{ м}$). В широком окне прозрачности атмосферы 7,5–14 мкм функция поглощения принимает значения от 73 до 100% при сжигании угля и от 64 до 100% при сжигании торфа ($x = 10 \text{ м}$).

Оптическая толщина по коэффициентам поглощения $\tau = \alpha_{ГФ} \cdot x$ для разных компонентов ГФ, выбрасываемых в атмосферу, разная. Наибольшая величина наблюдается для компонентов H_2O и CO_2 . Именно этим компонентам соответствует наибольшее поглощение солнечной энергии, которая задерживается в атмосфере и которая является одной из причин парникового эффекта.

Даже при наличии очистительных систем дымовых газов, которые зависят от используемого типа топлива, в атмосферу попадает гораздо большее количество CO_2 (до 14 об. %), чем содержится в чистой атмосфере (0,03–0,045 об. %). В связи с этим усиливается поглощение вблизи основных полос в ближнем и среднем ИК-диапазоне (1,9; 2,7; 4,3; 10,6 и 14 мкм). В качестве примера на рисунке 5 приведены коэффициент поглощения и функции поглощения углекислого газа при концентрации CO_2 (14,074 об. %), соответствующей сжиганию угля в топке котла БКЗ-210-140Ф.

Помимо основных продуктов полного сгорания топлива, представленных в таблице

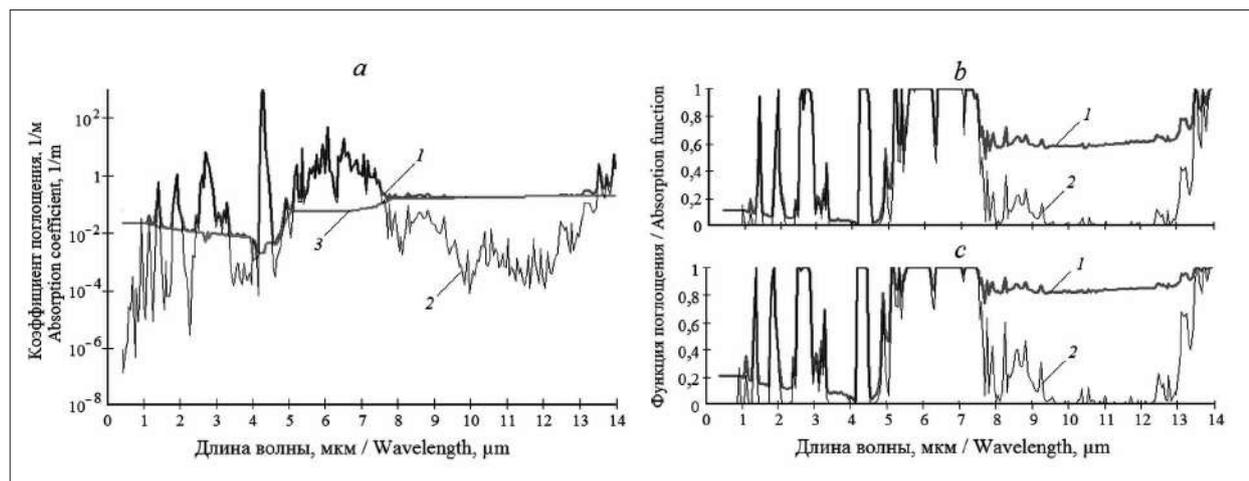


Рис. 3. Коэффициент поглощения (a) и функции поглощения (b, c) продуктов сгорания при сжигании угля: 1 – газ + частицы, 2 – газ, 3 – частицы
 Fig. 3. Absorption coefficient (a) and absorption spectra (b, c) of combustion products from peat combustion: 1 – gas + particles, 2 – gas, 3 – particles

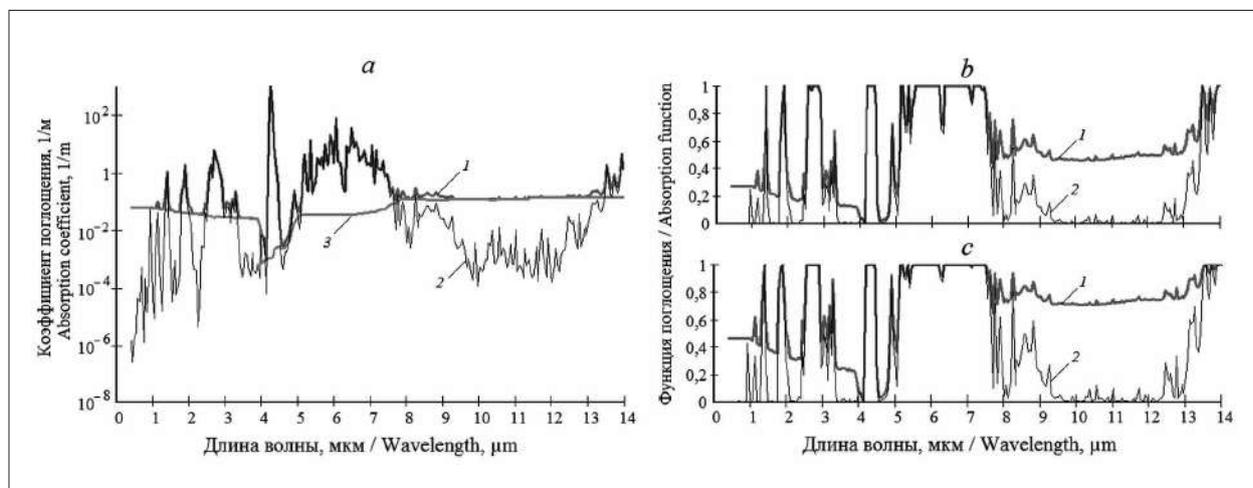


Рис. 4. Коэффициент поглощения (а) и функции поглощения (b, с) продуктов сгорания при сжигании торфа: 1 – газ + частицы, 2 – газ, 3 – частицы
Fig. 4. Absorption coefficient (a) and absorption spectra (b, c) of combustion products from peat combustion: 1 – gas + particles, 2 – gas, 3 – particles

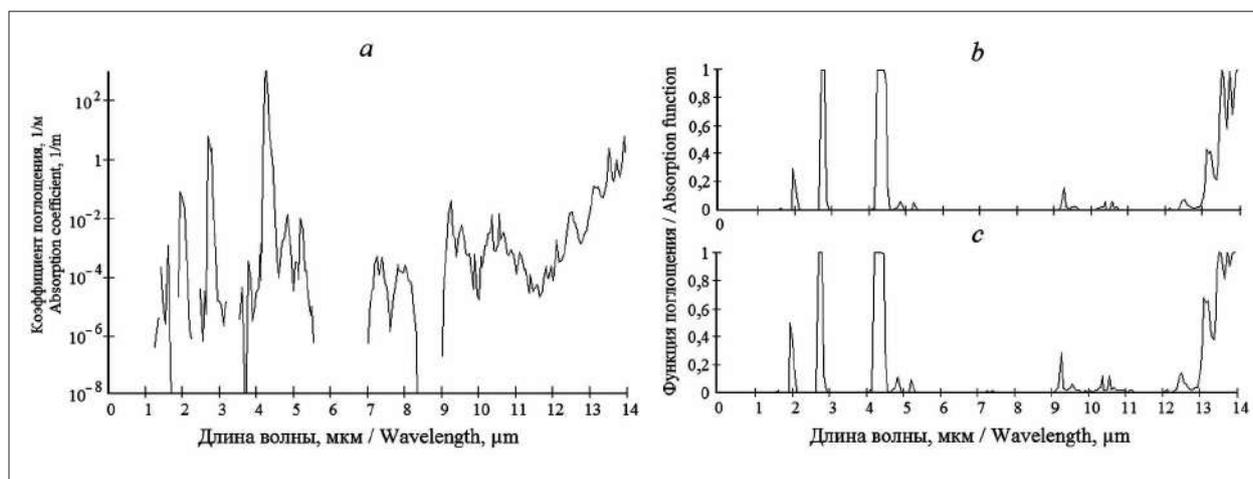


Рис. 5. Коэффициент поглощения (а) и функции поглощения (b, с) углекислого газа
Fig. 5. Absorption coefficient (a) and absorption functions (b, c) of carbon dioxide

2, в атмосферу попадают продукты неполного сгорания: NO_x (NO , NO_2 , N_2O), CO , SO_3 и другие вредные вещества.

Низкий выход NO_x достигается при сжигании топлива с высоким коэффициентом избытка воздуха α , что соответствует снижению температуры пламени, а также уменьшению скорости превращения CO в CO_2 . С повышением температуры продуктов сгорания повышается эффективность работы котла, но ухудшаются его экологические показатели [12].

Выбрасываемые дымовые газы, содержащие ГФ и частицы КФ, поглощают полученную солнечную энергию, меняют температурные и атмосферные условия (парниковый эффект). А компоненты газовой фазы NO_2 , NO , SO_2 , SO_3 в соединении с атмосферной влагой создают «кислотные дожди».

Заключение

В работе произведён расчёт коэффициентов поглощения и функций поглощения чистой атмосферы при температуре $T = 300 \text{ K}$, давлении $p = 10^5 \text{ Па}$ в спектральном интервале $\lambda = 0,4\text{--}14 \text{ мкм}$. Указаны основные полосы поглощения атмосферных газов, создающих природный парниковый эффект, и спектральные интервалы (окна прозрачности), способствующие оттоку теплового излучения от земной поверхности в мировое пространство.

Представленные характеристики Кузнецкого угля и торфа месторождений Кировской области, используемых на кировских ТЭЦ, позволили определить состав продуктов сгорания при сжигании твёрдых топлив в топках котлов БКЗ-210-140Ф. На основании химического состава газовой фазы и частиц

конденсированной фазы проведены расчёты коэффициентов поглощения и функций поглощения продуктов сгорания при сжигании угля и торфа. Функции поглощения определяли при толщинах слоя $x = 5$ и 10 м.

Наличие зольных частиц вносит существенный вклад в поглощение солнечного излучения продуктами сгорания в окнах прозрачности газовой фазы. При отсутствии системы очистки дымовых газов для оптического диапазона ($0,4-0,78$ мкм) поглощение может составлять до 20% при сжигании угля и до 46% при сжигании торфа ($x = 10$ м). В широком окне прозрачности атмосферы $7,5-14$ мкм функция поглощения продуктов сгорания принимает значения от 73 до 100% при сжигании угля и от 64 до 100% при сжигании торфа ($x = 10$ м).

Наибольшая оптическая толщина по коэффициентам поглощения газовой фазы приходится на компоненты H_2O и CO_2 , которые вносят основной вклад в создание парникового эффекта.

Выбрасываемые дымовые газы, содержащие также продукты неполного сгорания топлива (NO_x , CO , SO_2 и др.), поглощают полученную солнечную энергию, меняют температурные и атмосферные условия, а некоторые из них при соединении с атмосферной влагой создают «кислотные дожди».

Литература

1. МГЭИК, 2014: Изменение климата, 2014 г.: Обобщающий доклад. Вклад Рабочих групп I, II и III в Пятый оценочный доклад Межправительственной группы экспертов по изменению климата / Под ред. Р.К. Пачаури, Л.А. Мейера. Женева: МГЭИК, 2015. 163 с.

2. Ramanathan V., Carmichael G. Global and regional climate changes due to black carbon // *Nature Geoscience*. 2008. V. 1. No. 4. P. 221–227.

3. Ramanathan V., Crutzen P.J., Kiehl J.T., Rosenfeld D. Aerosols, climate, and the hydrological cycle // *Science*. 2001. V. 294. No. 5549. P. 2119–2124.

4. Национальный доклад о кадастре антропогенных выбросов из источников и абсорбции поглотителями парниковых газов не регулируемых Монреальским протоколом за 1990–2019 гг. Часть 1. М.: Росгидромет, 2021. 459 с.

5. Доклад об особенностях климата на территории Российской Федерации за 2020 год. М.: Росгидромет, 2021. 104 с.

6. Нурғалиев Д.К., Селивановская С.Ю., Кожевникова М.В., Галицкая П.Ю. Некоторые вызовы и возможности для России и регионов в плане глобального тренда декарбонизации // *Георесурсы*. 2021. Т. 23. № 3. С. 8–16.

7. Лазарев В.М., Корнеев Д.А. Использование карбоновых ферм для фиксации углекислого газа // *Успехи в химии и химической технологии*. 2021. Т. 35. № 2 (237). С. 7–9.

8. Эксперт – Напали на углеродный след [Электронный ресурс] <https://expert.ru/expert/2020/43/napali-na-uglerodnyj-sled/> (Дата обращения: 01.12.2021).

9. Climate Action Tracker – Glasgow’s 2030 credibility gap: net zero’s lip service to climate action [Электронный ресурс] <https://climateactiontracker.org/publications/glasgows-2030-credibility-gap-net-zeros-lip-service-to-climate-action/> (Дата обращения: 01.12.2021).

10. Зуев В.Е., Комаров В.С. Современные проблемы атмосферной оптики. Том 1. Статистические модели температуры и газовых компонент атмосферы. Ленинград: Гидрометеоздат, 1986. 264 с.

11. Тимофеев Ю.М., Васильев А.В. Теоретические основы атмосферной оптики. СПб.: Наука, 2003. 474 с.

12. Кузьмин В.А., Заграй И.А., Десятков И.А. Контроль образования оксидов азота в топке парового котла с целью защиты атмосферного воздуха от загрязнения // *Теоретическая и прикладная экология*. 2021. № 3. С. 126–132.

13. Кузьмин В.А., Заграй И.А., Маратканова Е.И., Десятков И.А. Исследование теплового излучения топочных газов в паровом котле при сжигании твёрдых топлив // *Теплофизика и аэромеханика*. 2019. Т. 26. № 2. С. 301–315.

14. Тепловой расчёт котельных агрегатов. Нормативный метод / Под ред. Н.В. Кузнецова, В.В. Митора, И.Е. Дубовского, Э.С. Карасиной. М.: Эколит, 2011. 296 с.

15. Кузьмин В.А., Заграй И.А., Десятков И.А. Исследование дисперсности и химического состава частиц в продуктах сгорания при сжигании газоторфяной смеси в паровом котле БКЗ-210-140Ф // *Известия вузов. Проблемы энергетики*. 2016. № 5–6. С. 55–63.

16. Кузьмин В.А., Заграй И.А., Рукавишников Р.В. Комплексное исследование теплового излучения гетерогенных продуктов сгорания при сжигании торфа в энергетических установках // *Тепловые процессы в технике*. 2015. Т. 7. № 10. С. 459–464.

References

1. IPCC, 2014: Climate Change 2014: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change / Eds. R.K. Pachauri, L.A. Meyer. Geneva: IPCC, 2015. 163 p. (in Russian).

2. Ramanathan V., Carmichael G. Global and regional climate changes due to black carbon // *Nature Geoscience*. 2008. V. 1. No. 4. P. 221–227. doi: 10.1038/ngeo156

3. Ramanathan V., Crutzen P.J., Kiehl J.T., Rosenfeld D. Aerosols, climate, and the hydrological cycle // *Science*. 2001. V. 294. No. 5549. P. 2119–2124. doi: 10.1126/science.1064034

4. National report on the inventory of anthropogenic emissions from sources and removals by sinks of greenhouse gases not regulated by the Montreal Protocol for 1990–2019. Part 1. Moskva: Rosgidromet, 2021. 459 p. (in Russian).
5. A report on climate features on the territory of the Russian Federation in 2020. Moskva: Rosgidromet, 2021. 104 p. (in Russian).
6. Nurgaliev D.K., Selivanovskaya S.Yu., Kozhevnikova M.V., Galitskaya P.Yu. Some challenges and opportunities for Russia and regions in terms of the global decarbonization trend // *Georesursy*. 2021. V. 23. No. 3. P. 8–16 (in Russian). doi: 10.18599/grs.2021.3.2
7. Lazarev V.M., Korneev D.A. The use of carbon farms for carbon dioxide fixation // *Uspekhi v khimii i khimicheskoy tekhnologii*. 2021. V. 35. No. 2 (237). P. 7–9 (in Russian).
8. Expert – They attacked the carbon footprint [Internet resource] <https://expert.ru/expert/2020/43/napalinya-uglerodnyj-sled/> (Accessed: 01.12.2021).
9. Climate Action Tracker – Glasgow’s 2030 credibility gap: net zero’s lip service to climate action [Internet resource] <https://climateactiontracker.org/publications/glasgows-2030-credibility-gap-net-zeros-lip-service-to-climate-action/> (Accessed: 01.12.2021).
10. Zuev V.E., Komarov V.S. Modern problems of atmospheric optics. Volume 1. Statistical models of temperature and gas components of the atmosphere. Leningrad: Hydrometeoizdat, 1986. 264 p. (in Russian).
11. Timofeev Yu.M., Vasiliev A.V. Theoretical foundations of atmospheric optics. Sankt-Peterburg: Nauka, 2003. 474 p. (in Russian).
12. Kuzmin V.A., Zagrai I.A., Desiatkov I.A. Monitoring the formation of nitrogen oxides in the furnace of a steam boiler for protection of atmospheric air from pollution // *Theoretical and Applied Ecology*. 2021. No. 3. P. 126–132 (in Russian). doi: 10.25750/1995-4301-2021-3-126-132
13. Kuzmin V.A., Zagrai I.A., Maratkanova E.I., Desiatkov I.A. Investigation of thermal radiation of furnace gases generated from solid-fuel combustion in a steam boiler // *Thermophysics and Aeromechanics*. 2019. V. 26. No. 2. P. 281–294. doi: 10.1134/S0869864319020112
14. Heat calculations for boilers. Guideline approach / Eds. N.V. Kuznetsov, V.V. Mitor, I.E. Dubovsky, E.S. Karasina. Moskva: Ekolite, 2011. 296 p. (in Russian).
15. Kuzmin V.A., Zagrai I.A., Desyatkov I.A. Research of dispersity and chemical composition of particles in the combustion products at gas-peat mixture burning in the steam boiler BKZ-210-140F // *Izvestia Vuzov. Problemy Energetiki*. 2016. No. 5–6. P. 55–63 (in Russian).
16. Kuzmin V.A., Zagray I.A., Rukavishnikova R.V. A comprehensive study of the thermal radiation of heterogeneous combustion products at the combustion of peat in power plants // *Teplovye protsessy v tekhnike*. 2015. V. 7. No. 10. P. 459–464 (in Russian).

Защита окружающей среды при добыче полезных ископаемых в Арктике: правовые аспекты

© 2023. П. П. Баттахов, к. ю. н., зам. ген. директора, с. н. с.,
Институт государства и права Российской академии наук,
119019, Россия, г. Москва, ул. Знаменка, д. 10,
e-mail: battakhov@mail.ru

В статье рассматриваются основные аспекты правового регулирования охраны и защиты окружающей среды при добыче полезных ископаемых на арктических территориях России в соответствии с законодательством Российской Федерации и международными конвенциями. Подчёркнута уникальность арктической территории в правовом, экономическом и экологическом аспектах. Отмечено, что минерально-сырьевая база Арктики является основой российской экономики. Выявлено, что добывающие предприятия нередко причиняют вред окружающей среде Арктики. Проанализированы крупные экологические катастрофы, их последствия и возможные меры по их предотвращению. К ним, в частности, относится введение критерия соразмерности добычи природных ресурсов, профилактические мероприятия, экологический мониторинг, усовершенствование законодательной базы и т. д. Предложено ужесточить меры имущественной ответственности для добывающих компаний при нарушении экологических и экономических требований. При этом добывающим коммерческим организациям при получении лицензии на пользование недрами необходимо выдавать её в соответствии с федеральным законом от 21 февраля 1992 г. № 2395-1 «О недрах». Важным элементом при охране и защите окружающей среды является развитие коренных малочисленных народов Севера как хранителей Российской Арктики. Сделан вывод о том, что необходимо предложить принятие комплексного закона «Об охране окружающей среды при добыче полезных ископаемых на территории Арктики Российской Федерации», с учётом действующих международных конвенций и Конституции России.

Ключевые слова: Арктика, лицензия на пользование недрами, хозяйственная деятельность, экология, защита, субъекты.

Environmental protection during mining in the Arctic: legal aspects

© 2023. P. P. Battakhov ORCID: 0000-0003-2251-4312³
Institute of State and Law of the Russian Academy of Sciences,
10, Znamenka St., Moscow, Russia, 119019,
e-mail: battakhov@mail.ru

The article discusses the main aspects of environmental protection and legal regulation of mining operations in the Russian Arctic regions, as required by Russian legislation and international conventions. The work highlights the distinctive legal, economic and environmental aspects of the Arctic region. Moreover, it points out that the minerals and raw materials base of the Arctic is the foundation of the Russian economy. The author focused on issues within the Constitution of the Russian Federation, that officially authorizes ownership of the subsoil. It is found that extractive industries often cause damage to the Arctic environment. Major environmental disasters, their consequences and possible measures to prevent them were also analyzed. For example, the criterion of proportionality in the extraction of natural resources, preventive measures, environmental monitoring, improvement of the legal framework, etc. And the special role of the increasing number of environmental disasters is also mentioned. We propose that property liability measures for extractive companies in violating environmental and economic requirements should be stricter. However, extractive commercial organizations must be granted a subsoil license in accordance with Federal Law No. 2395-I of 21 February 1992 “On Subsoil”. Accordingly, it is necessary to replace the auction with a tender-based bidding process in the above-mentioned law. The author has pointed out that an important element in the protection and conservation of the environment is the development of the activities of native minorities of the North as custodians of the Russian Arctic. It draws the conclusion stating the necessity of proposing the passage of a comprehensive law “On environmental protection in the extraction of mineral resources within the Arctic of the Russian Federation”, taking into account the existing international conventions and the Russian Constitution, its structure is defined.

Keywords: Arctic, license for the use of mineral resources, economic activity, subsoil, ecology, subjects.

Арктика представляет собой уникальную территорию в силу исторических, демографических, экологических и других особенностей. По показателю плотности населения одним из густонаселённых государств мира является Российская Федерация (РФ). По мнению экспертов, северные регионы России занимают более 50% площади всей территории нашего государства. В XX веке Россия приобрела неповторимый опыт освоения Арктики и северных территорий. При этом россияне были первыми, кто начал осуществлять крупные проекты, связанные с исследованиями в Арктике.

Для России Арктическая зона играет важную стратегическую роль, во-первых, потому, что вмещает в себя большое число её субъектов, и, во-вторых, ввиду того, что в ней представлено много самобытных культур. Таким образом, Арктика – это неповторимый элемент России, расширяющий её многообразие во всех сферах жизнедеятельности, а также этнический состав. Кроме того, как известно, Арктическая зона России богата ископаемыми минералами.

Целью данного исследования является правовое регулирование охраны и защиты окружающей среды страны при добыче полезных ископаемых в Арктической зоне России. Для этого следует ужесточить имущественную ответственность для юридических и должностных лиц. В последующем принять комплексный федеральный закон для сохранения окружающей среды и развития Арктической зоны России.

Объекты и методы исследования

Объект исследования – общественные отношения, касающиеся экологических, предпринимательских и гражданских прав и возникающее правовое регулирование защиты и охраны окружающей среды при добыче полезных ископаемых между субъектами права. Предметом исследования является совокупность правовых норм, регулирующих данные отношения. Конституция России, регулирующая общие отношения по недрам, имеет большую значимость. Материалами исследования являются международные конвенции, федеральные законы, законы субъектов, Указы Президента РФ и постановления Правительства РФ в сфере защиты и охраны окружающей среды при добыче полезных ископаемых, а также работы известных зарубежных и отечественных учёных. При анализе

материалов в исследовании были применены справочные правовые системы «Консультант-Плюс» и «Гарант». Поиск научной литературы по теме исследования проводили с помощью электронных библиотек «КиберЛенинка», «Национальная электронная библиотека РФ» и «eLIBRARY.RU», а также в сети «Интернет».

В работе использованы сравнительно-правовой, формально-догматический, социологический, исторический, комплексно-правовой, логический методы исследования, а также методы системного толкования нормативных текстов и аналогии правового моделирования.

Результаты и обсуждение

Бесспорным является факт, что системное развитие России связано с прогрессом хозяйственно-экономической деятельности арктических территорий. Кроме того, необходимо отметить, что только чёткая правовая система и согласованные строгие юридические предписания для различных субъектов РФ и крупных отраслевых и межотраслевых корпораций могут увязать объективную территориально-отраслевую разобщённость стратегии территориального развития России.

Как известно, основой российской экономики являются минерально-сырьевая база и экспорт ресурсов минерального сырья и элементов его переработки, и именно в недрах РФ находится большая часть полезных ископаемых мира. По этой причине Россия входит в перечень лидирующих стран по запасам, разработке и экспорту природного газа, нефти, руд (никель, медь, железо), угля, золота, фосфатов, платиноидов. Также, Арктика богата и другими ценными ресурсами – никелевыми, медными, урановыми, вольфрамовыми и другими рудами, здесь располагаются и огромные запасы угля [1].

Кроме того, необходимо особо подчеркнуть проблему негативного влияния на недра со стороны антропогенных факторов, так как при этом происходит нарушение их характеристик. Выражается это в том, что в процессе разработки месторождений часто не соблюдаются нормы, предусмотренные законом. Последствия данных нарушений имеют негативный характер и свидетельствуют о важности изучения вопросов, связанных с компенсацией вреда, причинённого добычей полезных ископаемых. При этом основы возмещения вреда окружающей среде определяются на законодательном уровне: в соответствии со ст. 75 Федерального

закона № 7 «Об охране окружающей среды» от 10.01.2002 [3], любое нарушение закона в сфере защиты окружающей среды влечёт за собой соответствующую ответственность – уголовную, дисциплинарную, а также административную и имущественную [4].

Таким образом, особо значимыми вопросами правового регулирования является, во-первых, охрана и защита окружающей среды, и, во-вторых, развитие хозяйствующих субъектов (коммерческое направление). Необходимо отметить, что только при условии, что данные вопросы правового регулирования будут решаться на должном уровне, возникнут условия для развития экопредпринимательства. При этом для сохранения фауны и флоры Арктики в целом вышеперечисленные направления должны выражаться не только на законодательном, но и на правоприменительном уровне.

Бесспорным является факт, что данный момент организации, специализирующийся на добыче полезных ископаемых, причиняет вред природе Арктической зоны. Следовательно, в отношении данных организаций должен быть налажен жёсткий системный санкционный подход, связанный с ужесточением мер ответственности добывающих компаний.

В связи с этим достаточно вспомнить серьёзные экологические чрезвычайные ситуации XXI века, которые происходили в Якутии из-за халатности компании «Алроса», занимающейся добычей алмазов.

Так, в 2017 г. в г. Мирный произошла чрезвычайная ситуация: в шахту резко начала поступать вода, которая повлекла за собой гибель работников рудника «Мир» (произошёл прорыв шахты). Два года спустя всемирно известная горнодобывающая компания снова нарушила экологические нормы, поскольку из-за прорыва поллютанты из донных отложений начали поступать в р. Вилюй, Ирелях, Малая Ботубобия [5]. Эта катастрофа сыграла роковую роль для рек Якутии, а также для людей, проживающих в группах Вилюйских улусов. Так, в последние годы среди жителей увеличилось число случаев заболевания раком. На сегодняшний день работы по осуществлению очистных мероприятий не выполняются, а вред был возмещён не полностью.

В Красноярском крае в 2020 г. произошла экологическая катастрофа по вине компании «Норникель», которая осуществляет добычу полезных ископаемых. В р. Амбарная вытекло около 20 тыс. т дизельного горючего, и компания до сих пор не может полностью

ликвидировать последствия произошедшего [6]. Масштабы разрушений, о которых стало известно от независимых экологов из России и других стран, привлекли общественное внимание в средствах массовой информации и фактически означали уничтожение живой природы на месте катастрофы.

Для предотвращения подобных катастроф необходимо, во-первых, соблюдение правовых норм, прежде всего, экологического и гражданского законодательства. Речь также идёт о нормах, которые были приняты в рамках международных конвенций для достижения цели экологической безопасности.

Во-вторых, проблема состоит в том, что полезные ископаемые добываются в арктических странах с нарушением количественной соразмерности. Это означает, что регулирующими органами стран, где активно ведётся добыча, должен вводиться критерий соразмерности добычи природных ресурсов. Кроме того, для предотвращения изменений климата в арктическом регионе, правила добычи полезных ископаемых должны устанавливаться на федеральном уровне.

Наконец, профилактическая работа в экологической сфере должна проводиться на федеральном уровне, что является важным условием для предотвращения глобальных экологических катастроф. Государство в лице федеральных органов должно обеспечивать совершенствование действующего законодательства в России в целом с целью адаптации к нынешним реалиям экономического и политического характера, а также комплексного устойчивого развития арктических территорий.

Несмотря на вышеперечисленное, необходимо отметить, что благодаря усилиям Президента РФ принимаются различные меры, способствующие сохранению флоры и фауны Арктики. Так, в Указе Президента РФ № 645 «О Стратегии развития Арктической зоны РФ и обеспечения национальной безопасности до 2035 г.» от 26.10.2020, государство обязано обеспечивать улучшение условий жизни людей, проживающих в Арктической зоне России [7]. В то же время вышеупомянутый Указ Президента РФ регулирует большой спектр развития земель российской Арктики на десятилетний период и обеспечивает совершенствование Арктики и сохранение её экологической обстановки.

Кроме того, существует ещё один фактор [8], который при защите экологической безопасности не принимается во внимание.

Речь идёт о том, что Россия достаточно велика по своей территории, но при этом со стороны федеральной государственной власти не осуществляется должного контроля в сфере экологических отношений в Арктической зоне. Что касается муниципальных органов государственной власти на территории Арктики, несмотря на достаточную активность граждан, представители власти некоторых субъектов не осуществляют профилактические меры для предотвращения экологических чрезвычайных ситуаций. Как оказалось, эта проблема распространена не только в России, но и в мире в целом.

На основе вышеизложенного можно сделать следующие выводы. Во-первых, РФ представляет собой единую территорию, которая состоит из внутренних вод, территориальных морей, территорий субъектов страны и воздушного пространства. Поскольку ключевыми характеристиками России являются целостность и верховенство закона, ответственность за экологические катастрофы должно нести государство, должностные лица и коммерческие организации. Речь идёт о том, что добывающие организации и должностные лица, совершившие преступления, должны привлекаться к ответственности вплоть до максимального наказания, предусмотренного кодифицированными нормативно-правовыми актами по УК РФ, КоАП РФ, ТК РФ и ГК РФ.

Во-вторых, что касается экономического [9] благосостояния коренных жителей Арктической зоны, то, согласно прогнозам, российская экономика обладает резервами для роста в разных направлениях, существует и некоторый задел развития потенциала гражданина РФ. При этом необходимо, чтобы в арктических регионах страны была реализована внутренняя государственная политика, которая заключается в трудоустройстве местных коренных кадров в сырьевых компаниях, занимающихся добычей полезных ископаемых. Названная мера может способствовать также решению вышеперечисленных задач по экологической безопасности. Если данные решения будут активно внедряться на практике, с одной стороны, темп урбанизации может замедлиться, а, с другой стороны, местные сырьевые компании не будут осуществлять свою деятельность в нарушение законодательства страны.

Другой вывод носит демографический характер и относится также к малочисленным коренным народам, проживающим на территориях, приравненных к Арктической зоне.

Учитывая как собственный российский, так и мировой опыт, необходимо признать, что единственным способом для создания приемлемых условий работы человека в суровых условиях Арктики является: создание для людей, развивших желание трудиться в Арктической зоне России, более комфортных условий труда и отдыха. При этом стандарты для жилья, норм питания [10], транспорта, медицинского обслуживания, связи и информационных услуг непременно должны быть выше, чем для других, «несеверных» территорий. На наш взгляд, это самый эффективный способ для привлечения новых рабочих рук и остановки оттока людей с арктической территории. Так, по данным переписи населения, общая численность коренного населения составляет всего около 50 тыс. человек. Разумеется, при этом не должны страдать права некоренных национальностей и приезжего населения.

Таким образом, в сложнейших природных и климатических условиях Арктики человек должен ощущать свой высокий статус, а законодательные гарантии – реализовываться. Кроме того, на северных территориях Арктики введение рыночных механизмов хозяйственной деятельности должно быть постепенным и взвешенным и осуществляться только после инфраструктурного обустройства, обеспечивающего комфортную среду для работы и полноценного отдыха человека в крайне сложных климатических условиях.

Переходя к вопросу о необходимых мерах государственной политики в области обеспечения экологической безопасности в Арктической зоне, можно отметить, что к ним относятся следующие виды деятельности: установление специальных режимов природопользования и охраны окружающей природной среды; рекультивация нарушенных природных ландшафтов; переработка и утилизация токсичных промышленных отходов, что позволит обеспечить достаточный уровень химической безопасности [11]. При этом подход к решению ключевых проблем северных территорий на нормативно-правовом уровне должен быть плановым, директивным, строго обоснованным с научных позиций и многократно выверенным.

Кроме того, в сфере экологической безопасности в Арктике возникают следующие проблемы [12]. Последние 11 лет на федеральном уровне субъектами законодательной инициативы было разработано восемь законопроектов о регулировании правоотношений на арктической территории страны. При этом

в соответствии с законодательством отчётность доходов и расходов данных организаций должна быть прозрачной. Проблема состоит в том, что заинтересованные лица и субъекты предпринимательства не полностью контролируют деятельность сырьевых коммерческих организаций.

Одним из ключевых нормативно-правовых актов является федеральный закон от 8 августа 2001 г. № 129-ФЗ «О государственной регистрации юридических лиц и индивидуальных предпринимателей», в который следует внести изменения [13]. Речь идёт о том, что необходимо зарегистрировать сырьевые компании на местах хозяйственной деятельности, то есть на арктической территории страны для сохранения налога на прибыль на местах. На перспективу это самый эффективный способ для восстановления экономики Арктической зоны России.

В арктических субъектах на сегодняшний день предприниматели создают производственные мощности и высокооплачиваемые рабочие места. В связи с этим представляется целесообразным обязать хозяйствующие субъекты, получающие лицензию на разработку значительных месторождений, нести ответственность за состояние окружающей среды на конкретном участке. Корректное выполнение правил экологической безопасности должно обеспечиваться обновлённым законодательством РФ, дополненным и изменённым по части добычи полезных ископаемых. Следует лицензировать отраслевые компании согласно ФЗ № 2395-1 от 21 февраля 1992 г. «О недрах», переработать и видоизменить регламент конкурсных торгов [14]. Соискатели лицензий на пользование недрами должны конкурировать на общих конкурсных началах, а не в условиях аукционов или раздачи ведомственных приказов. Дело в том, что де-факто часто происходит так, что отраслевики, выигравшие аукцион, надолго «замораживают» вверенное им месторождение. Кроме того, возможна ещё одна нежелательная для страны ситуация – победа зарубежного предпринимателя на аукционе. Следовательно, необходимо в обязательном порядке обозначить в договоре список объектов общественного назначения и сроки их ввода. К проведению конкурса следует привлечь органы федеральной исполнительной власти, а также региональной, в зависимости от места разработки месторождения полезных ископаемых. Необходимо отметить [15], что вышеперечисленные нормативные акты должны реализовываться на практике на должном

уровне. В арктическом сообществе России можно назвать мировым лидером [16] и ресурсной страной, которая должна соблюдать все международные конвенции и принимать внутреннее законодательство, соответствующее им. Однако в настоящее время правоотношения в данной сфере не урегулированы на должном уровне. Обновление правовой базы и принятие специального кодифицированного нормативного акта позволит решить эту проблему.

Заключение

Важнейшим фактором сохранения биологического разнообразия в условиях многолетней мерзлоты в Арктической зоне [17] и улучшением условий жизни людей, проживающих на этих территориях, является самозащита граждан РФ от нарушений в области экономики и экологии, а также ужесточение ответственности добывающих предприятий за нарушение законодательства об охране окружающей среды. На данный момент важно создавать Концепцию развития Арктической зоны непосредственно внутри страны и общую программу международного значения во взаимодействии с арктическими государствами. Для реализации этой цели следует привлекать учёных и инвесторов. Кроме того, со стороны арктических государств должна поступать необходимая материальная поддержка учёных, которые занимаются соответствующими проектами. Упорядоченный подход государственных органов по экологическому и экономическому совершенствованию арктических территорий внесёт значительный вклад в развитие российской Арктики. На промышленных предприятиях необходимо проводить профилактические мероприятия для предотвращения экологических катастроф в районах, где осуществляется разработка месторождений. Для реализации вышеперечисленных задач должен быть создан независимый орган мониторинга экологических катастроф на федеральном уровне. Необходимо, чтобы принятые меры были эффективными и давали положительный результат, что возможно, если каждый субъект будет нести ответственность за правонарушение и причинение убытков. Только при принятии данных мер можно остановить ухудшение экологической ситуации в Арктике.

Литература

1. Battahov P.P., Zankovsky S.S., Budnikova Y.E., Lizikova M.S. The impact of economic activity on the

Arctic environment and legal problems of the protection of its natural resources // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 2019. V. 263. Article No. 012063.

2. Бринчук М.М. Государственная территория и отношения собственности на природные ресурсы // Астраханский вестник экологического образования. 2022. № 3 (69). С. 163–170.

3. Бринчук М.М., Каспрова Ю.А. Арктика как специфический объект экологической безопасности // Вестник Удмуртского университета. Серия Экономика и право. 2021. Т. 31. № 2. С. 235–242.

4. Куделькин Н.С. Проблемы возмещения вреда в сфере недропользования // Вестник. Государство и право. 2018. № 25. С. 111–113.

5. Обедин В. Нечистой воды алмазы [Электронный ресурс] www.kommersant.ru/doc/3730492 (Дата обращения: 31.08.2018).

6. Баттахов П.П. Деятельность хозяйствующих субъектов в Арктической зоне России: перспективы развития // Право и государство: теория и практика. 2022. № 1 (205). С. 23–27.

7. Прокопьев А.А. Актуальные проблемы правового регулирования туризма Арктики на примере Республики Саха (Якутия) // Научный электронный журнал Меридиан. 2021. № 4 (57). С. 123–125.

8. Клеандров М.И. О необходимости института охраны прав предпринимательских структур в системе предпринимательского права // Государство и право. 2021. № 8. С. 7–20.

9. Габов А.В. Тенденции и проблемы правового регулирования взаимоотношений государства и бизнеса // Журнал российского права. 2015. № 1 (217). С. 13–23.

10. Лебедева У.М., Баттахов П.П., Степанов К.М., Лебедева А.М., Занковский С.С., Булгакова Л.И., Винокурова Д.М. Организация питания детей и подростков на региональном уровне // Вопросы питания. 2018. Т. 87. № 6. С. 48–56.

11. Основы государственной политики Российской Федерации в Арктике на период до 2020 года и дальнейшую перспективу (утв. Президентом РФ 18 сентября 2008 г. № Пр-1969) // Российская газета «Центральный выпуск» от 30 марта 2009 г. № 53п.

12. Концева Е.М., Попов И.Ю., Власов Д.Ю., Першина Е.В., Андронов Е.Е., Абакумов Е.В. Влияние урбанизации на процессы биологических инвазий в Арктике (на примере Ямальского региона) // Теоретическая и прикладная экология. 2020. № 3. С. 210–216.

13. Российская Арктика – территория права: альманах. М.: Общество с ограниченной ответственностью «Издательский дом «Юриспруденция», 2016. 216 с.

14. Белкин О.Г. Некоторые вопросы совершенствования государственной регистрации юридических лиц // Научные тенденции: Юриспруденция: Сборник научных трудов по материалам X международной научной конференции. Санкт-Петербург: Международная Научно-

Исследовательская Федерация «Общественная наука», 2017. С. 4–5.

15. Микаэлян Р.С. Правовое регулирование деятельности в Арктике с учётом санкционного фактора // Вестник Балтийского федерального университета им. И. Канта. Серия: Гуманитарные и общественные науки. 2020. № 2. С. 5–12.

16. Савенков А.Н. Арктика: правовое обеспечение устойчивого развития и сотрудничества // Труды Института государства и права Российской академии наук. 2018. Т. 13. № 1. С. 22–42.

17. Жудро И.С. Правовой режим Арктики в условиях глобализации // Морской сборник. 2015. № 4 (2017). С. 44–50.

References

1. Battahov P.P., Zankovsky S.S., Budnikova Y.E., Lizikova M.S. The impact of economic activity on the Arctic environment and legal problems of the protection of its natural resources // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 2019. V. 263. Article No. 012063. doi: 10.1088/1755-1315/263/1/012063

2. Brinchuk M.M. State territory and property relations on natural resources // Astrakhan Bulletin of Ecological Education. 2022. No. 3 (69). P. 163–170 (in Russian). doi: 10.36698/2304-5957-2022-3-163-170

3. Brinchuk M.M., Kasprova Yu.A. Arctic as a specific object of environmental safety // Bulletin of Udmurt University. Economics and Law Series. 2021. V. 31. No. 2. P. 235–242 (in Russian). doi: 10.35634/2412-9593-2021-31-2-235-242

4. Kudelkin N.S. Problems of compensation for damage in the field of subsoil use // Vestnik. Gosudarstvo i Pravo. 2018. No. 25. P. 111–113 (in Russian).

5. Obedin V. Impure water diamonds [Internet resource] www.kommersant.ru/doc/3730492 (Accessed: 31.08.2018) (in Russian).

6. Battakhov P.P. Activity of economic entities in the Arctic zone of Russia: development prospects // Pravo i Gosudarstvo: Teoriya i Praktika. 2022. No. 1 (205). P. 23–27 (in Russian). doi: 10.47643/1815-1337_2022_1_23

7. Prokopyev A.A. Actual problems of legal regulation of tourism of the Arctic on the example of the Republic of Sakha (Yakutia) // Scientific Electronic Journal Meridian. 2021. No. 4 (57). P. 123–125 (in Russian).

8. Cleandrov M.I. On the need for the institution of protection of the rights of entrepreneurial structures in the system of entrepreneurial law // State and Law. 2021. No. 8. P. 7–20 (in Russian). doi: 10.31857/S102694520016386-5

9. Gabov A.V. Trends and problems of legal regulation of relations between the state and business // Journal of Russian Law. 2015. No. 1 (217). P. 13–23. doi: 10.12737/7245

10. Lebedeva U.M., Battakhov P.P., Stepanov K.M., Lebedeva A.M., Zankovsky S.S., Bulgakova L.I., Vinoku-

rova D.M. Organization of nutrition for children and adolescents at the regional level // *Voprosy Pitaniya*. 2018. V. 87. No. 6. P. 48–56 (in Russian). doi: 10.24411/0042-8833-2018-10066

11. The foundations of the state policy of the Russian Federation in the Arctic for the period up to 2020 and the future (approved by President of the Russian Federation September 18, 2008 No. Pr-1969) // Russian newspaper “Central Issue”. 2009. March 30. No. 53p. (in Russian).

12. Koptseva E.M., Popov I.Yu., Vlasov D.Yu., Pershina E.V., Andronov E.E., Abakumov E.V. An influence of urbanization on the processes of biological invasions in Arctic (on example of Yamal Autonomous Region) // *Theoretical and Applied Ecology*. 2020. No. 3. P. 210–216 (in Russian). doi: 10.25750/1995-4301-2020-3-210-216

13. Russian Arctic – territory of law: almanac. Moskva: Jurisprudence, 2016. 216 p. (in Russian).

14. Belkin O.G. Some issues of improving the state registration of legal entities // *Scientific trends: Jurisprudence: Collection of scientific works based on the materials of the X International Scientific Conference*. Sankt-Peterburg: CNC MNIF “Public Science”, 2017. P. 4–5 (in Russian). doi: 10.18411/spc-20-11-2017-01

15. Mikaelyan R.S. Legal regulation of activities in the Arctic, taking into account the sanctions factor // *Bulletin of the Baltic Federal University named after I. Kant. Series: Humanities and Social Sciences*. 2020. No. 2. P. 5–12 (in Russian).

16. Savenkov A.N. Arctic: legal support for sustainable development and cooperation // *Trudy Instituta gosudarstva i prava Rossiyskoy akademii nauk*. 2018. V. 13. No. 1. P. 22–42 (in Russian).

17. Judro I.S. The legal regime of the Arctic in the context of globalization // *Morskoy sbornik*. 2015. No. 4 (2017). P. 44–50 (in Russian).

К оценке вероятности роста первичной заболеваемости населения в условиях природной биогеохимической провинции, не вызывающей эндемий

© 2023. Е. А. Малкова^{1,2}, к. б. н., н. с.,
Е. В. Михеева², к. б. н., доцент,
И. А. Кшнясев¹, к. б. н., с. н. с.,

¹Институт экологии растений и животных УрО РАН,
620144, Россия, г. Екатеринбург, ул. 8 Марта, д. 202,

²Уральский государственный горный университет,
620144, Россия, г. Екатеринбург, ул. Куйбышева, д. 30,
e-mail: bay_81@mail.ru

Статья посвящена изучению первичной заболеваемости взрослого населения, как маркера медико-экологического благополучия, в условиях природной биогеохимической провинции, на территории которой концентрации тяжёлых металлов не достигают пороговых значений для возникновения эндемических заболеваний. Показано, что шансы первичного возникновения заболеваний системы кровообращения на территории провинции в 3,44 раза выше, чем в крупном мегаполисе (г. Екатеринбург) и в 2,57 раз выше, чем в условиях биогеохимического фона со сходной возрастной структурой исследуемого населения. Вероятность возникновения болезней органов дыхания в условиях провинции выше по сравнению с условиями города и биогеохимического фона в 1,49 и 1,85 раза соответственно. Болезни костно-мышечной системы могут возникать в районе аномалии в 2,5 и 1,38 раза чаще, чем на городской и фоновой территориях соответственно. Межгодовые колебания первичной заболеваемости внутри территорий не перекрывают межпопуляционные различия в изучаемых районах.

Ключевые слова: биогеохимическая провинция, первичная заболеваемость, геохимическая аномалия, группы болезней, мегаполис.

To estimation of the probability of human primary incidence growth in the conditions of a natural biogeochemical province without endemic diseases

© 2023. E. A. Malkova^{1,2} ORCID: 0000-0003-4908-9571
E. V. Mikheeva² ORCID: 0000-0003-3271-1512¹ I. A. Kshnyasev¹ ORCID: 0000-0002-6281-7644¹

¹Institute of Plant and Animal Ecology Urals Branch of RAS,
202, 8 Marta St., Ekaterinburg, Russia, 620144,

²Urals State Mining University,
30, Kuybisheva St., Ekaterinburg, Russia, 620144,
e-mail: bay_81@mail.ru

The article is dedicated to the human population primary morbidity in the natural biogeochemical province with heavy metal abundance (nickel, cobalt, chromium). In the studied region the concentrations of chemical elements, which form province, do not reach the endemic diseases limits. To investigate a five-year period human morbidity, the retrospective method was used. To classify the studied diseases, the International Classification of Diseases of the tenth revision was applied.

The primary morbidity investigations were carried through three territories: nickel-cobalt-chromium natural biogeochemical province, the Ekaterinburg megapolis, the biogeochemical background region, that are situated in the Sverdlovsk region of Russian Federation. The abnormal soil concentrations of heavy metal are from natural ultrabasic rocks chemistry origin. For morbidity odds analysis the generalized linear model was used; and canonical correspondence analysis was used for the investigation of morbidity structure. Statistically significant differences in the structure of primary morbidity of three investigated territories were found. The maximum level of primary morbidity odds was found in the natural biogeochemical province.

The odds of the primary occurrence of the circulatory system diseases in the province are 3.44 times higher than in megapolis (Ekaterinburg) and 2.57 times higher than in a biogeochemical background with a similar age structure of the

studied population. The respiratory diseases odds in the provinces are 1.49 and 1.85 times higher than in the Ekaterinburg and biogeochemical background respectively. The musculoskeletal system diseases risk in the biogeochemical province is 2.5 and 1.38 times higher than in the Ekaterinburg and biogeochemical background respectively.

The differences between the populations of the natural biogeochemical province, megapolis, and geochemical background territory are more significant than interannual primary morbidity fluctuations in the each studied population. This indicates a significant risk of non-endemic diseases caused by the natural geochemical factor.

Keywords: biogeochemical province, primary morbidity, geochemical anomaly, disease groups, megalopolis.

Способность отклоняющихся от нормы геохимических условий не только вызывать эндемические заболевания, но и осложнять течение широко распространённых болезней, известна и описана для разных почвенно-климатических зон [1–7]. Участки земной коры, для которых характерно содержание в грунтах и почве химических элементов, в три и более раз превышающих региональные фоновые значения [8], относят к положительным геохимическим аномалиям. В случае естественных геохимических аномалий высокие почвенные концентрации элементов обусловлены их поступлением из подстилающей горной породы. При этом содержание химических элементов уменьшается от нижних к верхним почвенным горизонтам. Техногенные геохимические аномалии формируются в результате хозяйственной деятельности человека вокруг крупных городов, промышленных предприятий, городских свалок. Для них максимальные концентрации загрязнителей отмечают в почве на глубине 5–10 см. Регистрация в районе геохимической аномалии биологических реакций на избыток или недостаток химических элементов позволяет характеризовать территорию как биогеохимическую провинцию.

В условиях природно-техногенных биогеохимических провинций отмечено увеличение количества заболеваний сердца, лёгких, желудочно-кишечного тракта в результате накопления сурьмы в системе почва–растения–человек при её добыче [2]. В юго-западной Англии частота заболеваний органов дыхания увеличивается при повышенном содержании платины в окружающей среде (ОС). Для поселений на Тибетском плато в Китае показано, что рост заболеваемости болезнями сердца и суставов связан с избытком фтора и дефицитом селена. В административном округе Приевидза центральной Словакии обнаружена связь распространения немеланомного рака кожи с загрязнением ОС мышьяком в результате деятельности электростанции, работающей на угле [7].

Для животных в условиях аномальных концентраций химических элементов в ОС (вследствие природных факторов или техно-

генного загрязнения) описаны следующие особенности: увеличение смертности, сокращение продолжительности жизни, изменения репродуктивных и иммунологических характеристик, аномалии развития [4, 5]. Зачастую это связывают с действием хронического окислительного стресса в условиях постоянного избытка химических элементов [9]. Например, в условиях природной биогеохимической провинции с избыточным содержанием кобальта, никеля и хрома нами показано, что у рыжей полёвки (*Myodes glareolus*) наблюдается стимуляция глюкокортикоидной функции надпочечника, свидетельствующая о повышении неспецифической резистентности [11]. Кроме того, на территории данной провинции было отмечено изменение структуры смертности и общей заболеваемости человека [12]. При этом на изучаемой территории отсутствуют эндемические заболевания животных и человека (фоновая биогеохимическая провинция).

В то время как причины, течение, меры профилактики и лечения эндемических заболеваний достаточно хорошо известны [3], возможные риски для здоровья населения в условиях биогеохимических провинций, не вызывающих эндемий, как правило, находятся вне сферы интересов медиков и экологов. Поэтому исследования заболеваемости в допороговых диапазонах воздействия аномально высоких природных концентраций химических элементов являются актуальными. Наряду со смертностью и общей заболеваемостью, первичная заболеваемость человека может служить маркером качества ОС и благополучия человеческой популяции в медико-экологических исследованиях [13–17].

Целью настоящего исследования является анализ первичной заболеваемости человека на территории природной биогеохимической провинции с избыточным содержанием никеля, кобальта и хрома.

Материалы и методы исследования

Исследования проведены в районе природной биогеохимической провинции с избыточным содержанием никеля, кобальта,

Таблица 1 / Table 1

Валовые концентрации (среднее) тяжёлых металлов в почве изучаемых районов, мг/кг
Gross concentrations (mean and confidence interval) of heavy metals in the soil of the studied areas, mg/kg

Элемент Element	Средне-уральский кларк Middle Ural clarke	Кларк почв населённых пунктов Settlements clarke	ПДК МАС	Район / Territory		
				БГХП BGCP n = 20	Екатеринбург (Калиновский лесопарк) Ekaterinburg (Forest park Kalinovskiy) n = 16	БГХФ BGCB n = 19
				почвенный горизонт А над чертой, почвенный горизонт В под чертой soil horizon A above line, soil horizon B under line		
Ni	30	33	50	<u>412,59</u> 849,65	<u>119,38</u> 290,53	<u>28,20</u> 42,19
Co	10	14	50	<u>83,50</u> 120,56	<u>15,62</u> 30,37	<u>14,05</u> 18,14
Cr	100	8	200	<u>1781,50</u> 1722,78	<u>45,72</u> 617,28	<u>35,96</u> 50,60
Pb	10	55	32	<u>65,85</u> 13,70	<u>33,16</u> 11,37	<u>16,57</u> 9,41

Примечание: БГХФ – биогеохимический фон; БГХП – биогеохимическая провинция.
Note: BGCB – biogeochemical background, BGCP – biogeochemical province.

хрома (п. Уралец Свердловской области, Урал, Россия) [11, 12]. Аномальные концентрации этих элементов в почве обусловлены ультра-основными горными породами (серпентиниты, пироксениты, дуниты). Для сравнения использовали две территории: биогеохимически фоновый район (Шалинский район Свердловской области, Урал, Россия), для почв которого аномальных концентраций химических элементов не установлено; крупный мегаполис с высоким уровнем техногенной нагрузки (г. Екатеринбург, Средний Урал, Россия).

В 2016 г. авторами с целью актуализации информации о содержании химических элементов в почве изучаемых районов были проведены геохимические изыскания. Почвенные образцы для элементопределений были отобраны методом «конверта» с глубин 5–10 см (горизонт А) и 30–40 см (горизонт В). Концентрации валовых форм изучаемых элементов (Ni, Co, Cr, Pb) были определены с помощью метода атомной абсорбции (табл. 1). Выбор данных элементов обусловлен предшествующими исследованиями [12, 18]. Результаты позволили подтвердить наличие естественной геохимической аномалии в окрестностях п. Уралец с избыточным содержанием никеля, кобальта и хрома. Средние концентрации этих элементов в почвенном горизонте В выше или равны их содержанию в верхнем почвенном горизонте

(А) и превышают региональный кларк более, чем в три раза. Наблюдаемые максимальные уровни накопления никеля и хрома в почве п. Уралец выше ПДК в 8 и более раз [19]. Для кобальта отмечается незначительное превышение ПДК в верхнем почвенном горизонте и более чем двукратное – в нижележащем горизонте. Среднее значение концентрации свинца на аномальной территории также превышает ПДК, но сопоставимо с кларком почв населённых пунктов [20].

Содержание ТМ в почвах лесопарков г. Екатеринбурга, как на основании собственных данных, так и литературных источников, свидетельствует о наличии природно-техногенной аномалии с неравномерным распределением тяжёлых металлов (ТМ) [12]. В частности, в Калиновском лесопарке отмечаются превышения ПДК для никеля и хрома в 2 и более раз, при этом концентрация элементов возрастает с глубиной почвенного профиля. Однако концентрации данных элементов ниже, чем на участке естественной геохимической аномалии (табл. 1). В других лесопарках Екатеринбурга отмечаются превышения уровней ПДК для меди, цинка, свинца [18].

В фоновом районе (Шалинском) концентрации кобальта, никеля и хрома в почве в 3–20 раз ниже, чем в районе природной

биогеохимической провинции (п. Уралец). Превышений по другим ТМ не отмечено [12].

На всех территориях проведено исследование относительной первичной заболеваемости человека ретроспективным методом за пятилетний период, классификация групп болезней приведена на основе Международной классификации болезней десятого пересмотра. Всего было изучено 19 групп болезней [12].

Исходные данные по заболеваемости и численности населения были предоставлены следующими организациями: МУЗ «Уральская участковая больница» (п. Уралец Свердловской области); Медицинский информационно-аналитический центр (г. Екатеринбург); Территориальный орган федеральной службы государственной статистики по Свердловской области (г. Екатеринбург). В соответствии с первичными данными в исследование были включены наблюдения за 5 лет: 4302 случая впервые зарегистрированных болезней на территории биогеохимической провинции, 24108 случаев – на территории биогеохимически фонового района (Шалинский район) и 2445446 – на территории г. Екатеринбурга.

Для аномальной и фоновой территорий по данным государственной статистики установлена практически идентичная возрастная структура. В частности, для обеих территорий характерно повышение численности старшей возрастной группы. Кроме того, сельская местность характеризуется и относительно более низким качеством медицинского обслуживания. Город Екатеринбург выбран в качестве второй территории сравнения, для того, чтобы оценить контрастность проявления эффектов действия геохимического фактора [12].

Для оценки шансов заболевания был использован аппарат общих регрессионных моделей, при этом 5 лет были рассмотрены как повторности, по которым можно проводить усреднение. Заболеваемость (в год) из шкалы отношений преобразовывали в аддитивную шкалу логарифма шансов-логитов:

$$\text{logit}(y) = \ln \left[\frac{n}{(N-n)} \right] = \ln \left[\frac{p}{(1-p)} \right],$$

где N – численность (взрослого) населения, а n – число первичных регистраций (любой болезни) в год. Для выявления особенностей структуры заболеваемости в субпопуляции заболевших использовали канонический анализ соответствий. Поскольку для двух из 19 групп болезней были отмечены

крайне низкие частоты или таковые вообще не были зарегистрированы в отдельные годы, две категории (17 и 18) были исключены из анализа. Статистический анализ и визуализация данных выполнены в среде «Statistica» (StatSoft Inc.).

Результаты и обсуждение

Исследование шансов первичной заболеваемости населения, проживающего на геохимически разнородных территориях (все группы болезней, включённые в анализ, за пятилетний период), продемонстрировало максимальное их значение в районе природной биогеохимической провинции с избыточным содержанием никеля, кобальта и хрома. На территории мегаполиса шансы первичного возникновения заболеваний статистически значимо ниже, чем в районе природной биогеохимической провинции. В районе биогеохимически фонового участка шансы исследуемой заболеваемости человека имеют минимальные показатели из всех изученных популяций (рис. 1).

Кроме того, показано, что и структура заболеваемости различными группами болезней

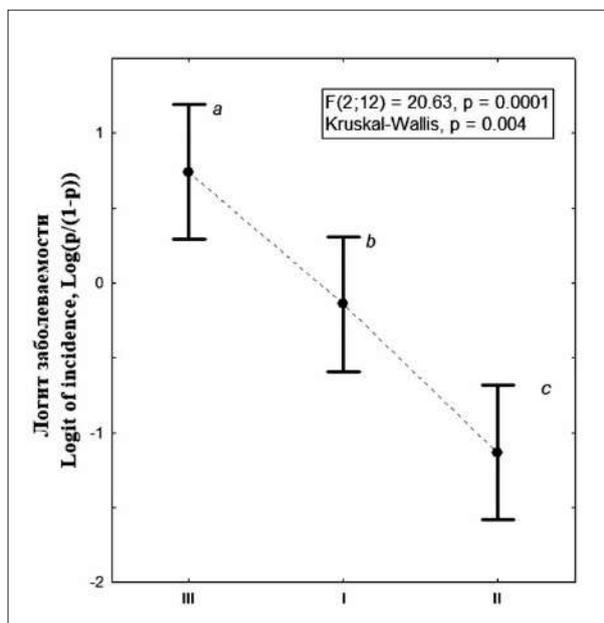


Рис. 1. Результаты ANOVA для логарифмов шансов (логиты, LogOdds) заболевания (в год): I – Екатеринбург; II – биогеохимический фон; III – биогеохимическая провинция. Не содержащие одинаковых символов оценки (a, b, c) статистически значимо различаются, $p < 0,05$

Fig. 1. ANOVA results of logOdds of primary morbidity (any diseases per year): I – Ekaterinburg (megapolis); II – biogeochemical background; III – biogeochemical province. All averages (a, b, c) are statistically different $p < 0.05$

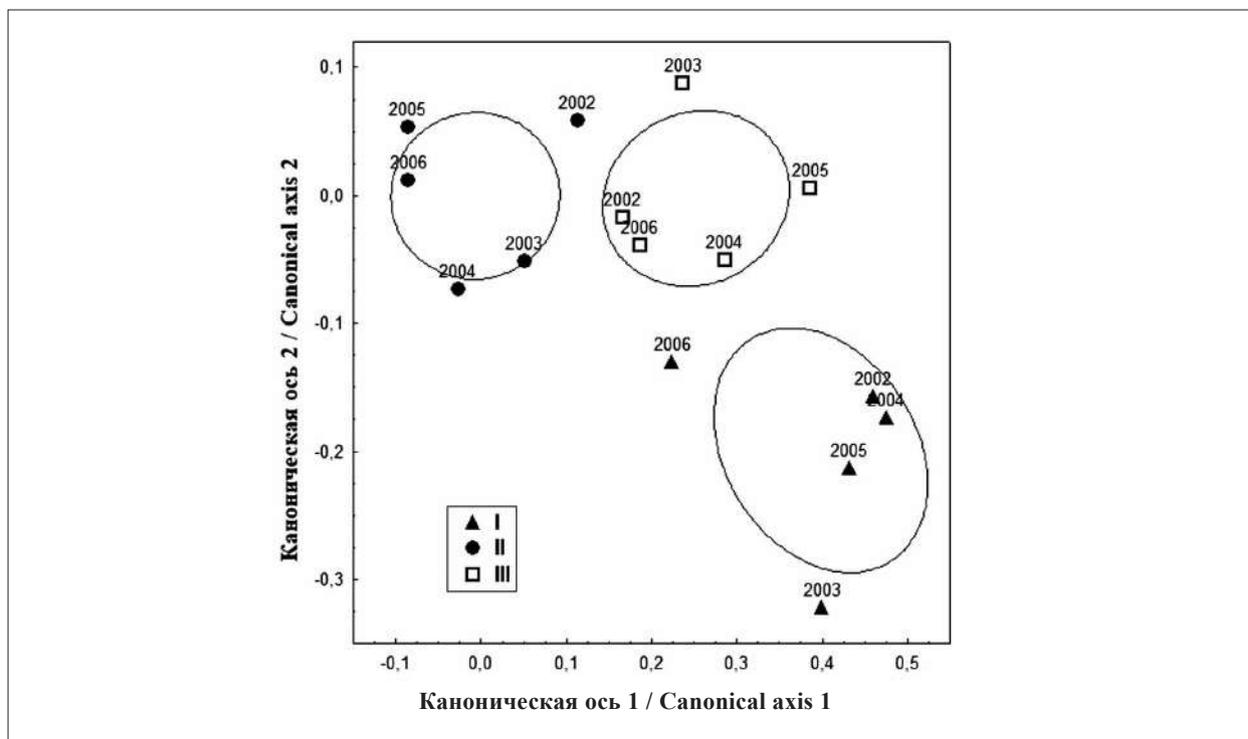


Рис. 2. Проекция «районы+годы» в плоскость двух первых канонических осей: I – Екатеринбург; II – биогеохимический фон; III – биогеохимическая провинция. Эллипсы – 95% доверительная вероятность. Первая ось противопоставляет г. Екатеринбург биогеохимическому фону и биогеохимической провинции. Вторая каноническая ось противопоставляет биогеохимическую провинцию г. Екатеринбургу и биогеохимическому фону

Fig. 2. Projection of the analyzed samples “areas+years” into the plane of first two canonical axes: I – Ekaterinburg (megapolis); II – biogeochemical background; III – biogeochemical province. Ellipses – 95% confidence. The first axis polarized the Yekaterinburg to the biogeochemical background and the biogeochemical province. The second canonical axis opposes the biogeochemical province to Ekaterinburg and the biogeochemical background

на изучаемых территориях неоднородна. При этом различия между заболеваемостью населения разных районов более существенны, чем межгодовые колебания показателей внутри популяции одной территории (рис. 2).

Сравнения анализируемых параметров демонстрируют статистически значимые различия между изученными выборками (табл. 2).

Высокие показатели первичной заболеваемости в биогеохимической провинции сформированы в основном за счёт трёх групп болезней: болезни системы кровообращения, органов дыхания и костно-мышечной системы. Шансы первичного возникновения заболеваний системы кровообращения на территории провинции в 3,44 раза выше, чем в крупном мегаполисе, и в 2,57 раза выше, чем в условиях биогеохимического фона с аналогичной возрастной структурой исследуемого населения. Шансы появления болезней органов дыхания в естественной провинции выше по сравнению с городскими и геохимически фоновыми условиями в 1,49 и 1,85 раза соот-

ветственно. Шансы возникновения болезней костно-мышечной системы в геохимически аномальном районе в 2,5 и 1,38 раза выше, чем на городской и фоновой территориях соответственно.

На территории изучаемой естественной биогеохимической провинции с высоким содержанием никеля, кобальта, хрома не обнаружено эндемических заболеваний, которые могут вызывать составляющие аномалию химические элементы. Возрастают шансы широкого распространения таких патологий, как болезни системы кровообращения, органов дыхания и костно-мышечной системы. Вероятно, концентрации ТМ, поступающих в организм с водой и сельскохозяйственной продукцией приусадебных участков, не достигают пороговых значений для проявления специфических синдромов, характерных для интоксикации. Негативное действие на здоровье населения в этом случае связано с формированием хронического окислительного стресса. Тяжёлые металлы обладают высокой

Таблица 2 / Table 2

Контрасты (сравнения с поправкой Бонферрони) средних значений логитов первичной заболеваемости за пятилетний период (все болезни за год) / Contrasts (*p* with Bonferroni correction) of 5 years averages of LogOdds of primary morbidity (any diseases per year)

Контрасты Contrasts	Δ^*	SE(Δ)	$p \leq$	95% доверительный интервал 95% confidence interval
БГХП – Екатеринбург BGCP – Ekaterinburg	0,884	0,292	0,032	0,07–1,70
БГХП – БГХФ BGCP – BGCB	1,875	0,292	0,0001	1,06–2,69
Екатеринбург – БГХФ Ekaterinburg – BGCB	0,990	0,292	0,016	0,18–1,80

Примечание: * – в логит-шкале; после поправки на множественные сравнения ни один контраст не теряет формальную «значимость». БГХФ – биогеохимический фон; БГХП – биогеохимическая провинция.

Note: * – in the logit scale, after correcting for multiple comparisons, no contrasts loses its formal “significance”. BGCB – biogeochemical background, BGCP – biogeochemical province.

афинностью к тиоловым группам белков, которые ответственны за защитные механизмы в клетке. Их длительное воздействие может приводить к повреждению мембран клеток и макромолекул, расстраивать механизмы клеточного транспорта, нарушать компарментализацию и инициировать процессы апоптоза в рамках комплексного процесса окислительного стресса [9].

При стрессорных реакциях активные формы кислорода способствуют запуску реакций адаптации организма к экстремальным условиям [21, 22]. Ведущая роль в поддержании гомеостаза посредством формирования адаптации при воздействии стрессовых факторов принадлежит глюкокортикоидам. Ранее проведенными исследованиями морфофизиологических особенностей животных в условиях изучаемой биогеохимической провинции установлена гипертрофия ядер и клеток пучковой зоны коры надпочечника. Это свидетельствует об интенсификации выработки гормонов (глюкокортикоидов), обеспечивающих повышение неспецифической резистентности животных [11]. Аналогичные процессы, возможно, характерны и для организма человека.

Таким образом, в условиях природного избытка ТМ животные и люди, вероятно, подвергаются хроническому окислительному стрессу, который сопровождается запуском реакций неспецифической адаптации посредством активации гипоталамо-гипофизарно-надпочечниковой системы. Это состояние можно характеризовать как хронический стресс, обусловленный стимуляцией кататоксических программ адаптации с определёнными энергетическими затратами и морфофизиологическими изменениями [21, 22]. В результате резервы организма и его сопротивляемость различным внешним факторам

снижаются, а шансы заболеваемости широко распространёнными группами болезней возрастают. При этом ответная физиологическая реакция организма человека будет донозологической в отношении эндемических заболеваний. Интегральным следствием таких адаптивных реакций является изменение структуры первичной заболеваемости населения широко распространёнными группами болезней.

Заключение

В данной работе впервые продемонстрировано, что первичное возникновение болезней системы кровообращения, органов дыхания и костно-мышечной системы может быть связано с условиями биогеохимической провинции, приуроченной к ультраосновным горным породам, обогащающим почву кобальтом, никелем и хромом. Межгодовые колебания первичной заболеваемости внутри территорий не перекрывают межпопуляционные различия в изучаемых районах.

Возрастание шансов впервые заболеть именно широко распространёнными заболеваниями подтверждает предположение о неспецифическом характере физиологической ответной реакции организма человека на территориях фоновых биогеохимических провинций, в условиях которых не достигнут порог возникновения эндемического заболевания.

Работа частично выполнена в рамках государственного задания Института экологии растений и животных УрО РАН.

Литература

1. Артеменков А.А. Проблема профилактики эндемических заболеваний и микроэлементозов у чело-

века // Профилактическая медицина. 2019. Т. 22. № 3. С. 92–100.

2. Tahir N., Shahid M., Khalid S., Dumat C., Pierart A., Khan N.N. Biogeochemistry of antimony in soil-plant system: Ecotoxicology and human health // Applied Geochemistry. 2019. V. 106. P. 45–59. doi: 10.1016/j.apgeochem.2019.04.006

3. Агаджанян Н.А., Скальный А.В. Химические элементы в среде человека и экологический портрет человека. М.: КМК, 2001. 83 с.

4. Ковальский В.В. Геохимическая среда, микро-элементы, реакции организмов // Тр. биогеохим. лаб. Ин-та геохимии и аналит. химии. Т. 22. М.: Наука, 1991. С. 5–23.

5. Environmental diseases from A to Z, environmental diseases from A to Z, NIH Publication No. 96 4145 US. Department of Health and Human Services National Institutes of Health National Institute of Environmental Health Sciences, Second Edition, June 2007 [Электронный ресурс] https://www.niehs.nih.gov/health/assets/docs_a_e/environmental_diseases_environmental_diseases_from_a_to_z_english_508.pdf (Дата обращения: 03.03.2020).

6. Loyola R.C., Carneiro A., Silveira A., La Rocca P., Nascimento M., Chaves R. Respiratory effects from industrial talc exposure among former mining workers // Revista de Saúde Pública. 2010. V. 44. No. 3. P. 541–547. doi: 10.1590/s0034-89102010005000017

7. Thornton I. Environmental geochemistry: 40 years research at Imperial College, London, UK // Applied Geochemistry. 2012. V. 27. No. 5. P. 939–953. doi: 10.1016/j.apgeochem.2011.07.015

8. Башкин В.Н., Касимов Н.С. Биогеохимия. М.: Научный мир, 2004. 648 с.

9. Flora S.J.S., Mittal M., Mehta A. Heavy metal induced oxidative stress & its possible reversal by chelation therapy // Indian J. Med. Res. 2008. V. 128. P. 501–523.

10. Грибовский Г.П., Грибовский Ю.Г., Плохих Н.А. Биогеохимические провинции Урала и проблемы техногенеза // Техногенез и биогеохимическая эволюция таксонов биосферы. М.: Наука, 2003. С. 174–187.

11. Михеева Е.В., Жигальский О.А., Мамина В.П., Байтмирова Е.А. Адаптация рыжей полёвки к условиям природной биогеохимической провинции с избыточным содержанием никеля, кобальта и хрома // Журнал общей биологии. 2006. Т. 67. № 3. С. 212–224.

12. Михеева Е.В., Байтмирова Е.А., Кшняев И.А. Заболеваемость человека в условиях естественной геохимической аномалии, не вызывающей эндемий // Экология человека. 2017. № 10. С. 21–27.

13. Сон И.М., Леонов С.А., Вайсман Д.Ш. Основные тенденции заболеваемости населения Российской Федерации в 2012–2013 гг. // Менеджер здравоохранения. 2014. № 9. С. 6–19.

14. Андреева Е.Е. Первичная и профессиональная заболеваемость взрослого населения Москвы // Ме-

дицина труда и промышленная экология. 2017. № 1. С. 50–53.

15. Курчанов В.И., Лим Т.Е., Чернявская И.В., Романчук В.П., Долгобородова Е.М. Анализ причинно-следственной связи между первичной заболеваемостью детского населения Санкт-Петербурга и уровнем загрязнения атмосферного воздуха выбросами от автотранспорта // Здоровье населения и среда обитания. 2014. № 2 (236). С. 30–33.

16. Зайнуллин В.Г., Боднарь И.С. Экологически обусловленная заболеваемость детского населения Республики Коми // Теоретическая и прикладная экология. 2012. № 2. С. 128–133.

17. Калинин С.И., Торопова С.И. Статистические методы анализа взаимосвязи качества атмосферного воздуха и состояния здоровья детского населения Кировской области // Теоретическая и прикладная экология. 2019. № 2. С. 143–148.

18. Байтмирова Е.А., Михеева Е.В., Беспмятных Е.Н., Донник И.М., Кривоногова А.С. Оценка загрязнения рекреационных зон мегаполиса тяжёлыми металлами (на примере Екатеринбурга) // Аграрный вестник Урала. 2016. № 4 (146). С. 71–77.

19. Ильин В.Б. Тяжёлые металлы в системе почва-растение. Новосибирск: Наука, 1991. 150 с.

20. Алексеенко В.А., Алексеенко А.В. Химические элементы в геохимических системах. Кларки почв селитебных ландшафтов. Ростов-на-Дону: Издательство Южного федерального университета, 2013. 381 с.

21. Морозов В.Н., Хадарцев А.А. К современной трактовке механизмов стресса // Вестник новых медицинских технологий. 2010. Т. XVII. № 1. С. 15–17.

22. Preiser J.C., Ichai C., Orban J.C., Groeneveld A.B.J. Metabolic response to the stress of critical illness // British Journal of Anaesthesia. 2014. V. 113. No. 6. P. 945–954. doi: 10.1093/bja/aeu187

References

1. Artemenkov A.A. The problem of the prevention of endemic human diseases and microelementoses // Profilakticheskaya medicina. 2019. V. 22. No. 3. P. 92–100 (in Russian).

2. Tahir N., Shahid M., Khalid S., Dumat C., Pierart A., Khan N.N. Biogeochemistry of antimony in soil-plant system: Ecotoxicology and human health // Applied Geochemistry. 2019. V. 106. P. 45–59. doi: 10.1016/j.apgeochem.2019.04.006

3. Agadzhanian N.A., Skal'nyj A.V. Chemical elements in the environment and the human ecological portrait. Moskva: KMK, 2001. 83 p. (in Russian).

4. Koval'skij V.V. Geochemical environment, trace elements, and reactions of organisms // Trudy Biogeohimicheskoy laboratorii Instituta geohimii i analiticheskoy himii. V. 22. Moskva: Nauka, 1991. P. 5–23 (in Russian).

5. Environmental diseases from A to Z, environmental diseases from A to Z, NIH Publication No. 96 4145 US. Department of Health and Human Services National Institutes of Health National Institute of Environmental Health Sciences, Second Edition, June 2007 [Internet recourse] https://www.niehs.nih.gov/health/assets/docs_a_e/environmental_diseases_environmental_diseases_from_a_to_z_english_508.pdf (Accessed: 03.03.2020).
6. Loyola R.C., Carneiro A., Silveira A., La Rocca P., Nascimento M., Chaves R. Respiratory effects from industrial talc exposure among former mining workers // *Revista de Saúde Pública*. 2010. V. 44. No. 3. P. 541–547. doi: 10.1590/s0034 89102010005000017
7. Thornton I. Environmental geochemistry: 40 years research at Imperial College, London, UK // *Applied Geochemistry*. 2012. V. 27. No. 5. P. 939–953. doi: 10.1016/j.apgeochem.2011.07.015
8. Bashkin V.N., Kasimov N.S. Biogeochemistry. Moskva: Nauchnyi mir, 2004. 648 p. (in Russian).
9. Flora S.J.S., Mittal M., Mehta A. Heavy metal induced oxidative stress & its possible reversal by chelation therapy // *Indian J. Med. Res.* 2008. V. 128. P. 501–523.
10. Gribovskiy G.P., Gribovskij Yu.G., Plohih N.A. Biogeochemical Provinces in the Urals and problems of technogenesis // *Tekhnogenez i biogeokhimicheskaya evolyutsiya taksonov biosfery*. Moskva: Nauka, 2003. P. 174–187 (in Russian).
11. Miheeva E.V., Zhigal'skiy O.A., Mamina V.P., Bajtimirova E.A. Adaptation of the bank vole (*Clethrionomys glareolus* Schreber) to conditions of biogeochemical province with abnormally high content of nickel, cobalt and chromium // *Zurnal obshchey biologii*. 2006. V. 67. No. 3. P. 212–224 (in Russian).
12. Miheeva E.V., Bajtimirova E.A., Kshnyasev I.A. Human morbidity in the conditions of natural geochemical anomaly that cause no endemic diseases // *Ekologiya cheloveka*. 2017. No. 10. P. 21–27 (in Russian).
13. Son I.M., Leonov S.A., Vajsman D.Sh. Main morbidity trends among Russian population in 2012–2013 // *Menedzher zdravohraneniya*. 2014. No. 9. P. 6–19 (in Russian).
14. Andreeva E.E. Primary and occupational morbidity among adult population of Moscow // *Medicina truda i promy'shlennaya ekologiya*. 2017. No. 1. P. 50–53 (in Russian).
15. Kurchanov V.I., Lim T.E., Chernyavskaya I.V., Romanchuk V.P., Dolgoborodova E.M. Analysis causal link between the primary child morbidity in Saint-Petersburg and levels of air pollution from motor vehicles emissions // *Zdorov'e naseleniya i sreda obitaniya*. 2014. No. 2 (236). P. 30–33 (in Russian).
16. Zainullin V.G., Bodnar I.S. Environmentally caused disease of children population of the Komi Republic // *Theoretical and Applied Ecology*. 2012. No. 2. P. 128–133 (in Russian). doi: 10.25750/1995-4301-2012-2-128-133
17. Kalinin S.I., Toropova S.I. Statistical methods for analyzing the correlatio between air quality and the state of children's health in the Kirov region // *Theoretical and Applied Ecology*. 2019. No. 2. P. 143–148 (in Russian). doi: 10.25750/1995-4301-2019-2-143-148
18. Bajtimirova E.A., Mikheeva E.V., Bespamyatn`ih E.N. Assessment of megalopolis recreational areas heavy metals pollution (in the city of Yekaterinburg) // *Agrarian Bulletin of the Urals*. 2016. No. 4 (146). P. 71–77 (in Russian).
19. Ilyin V.B. Heavy metals in soil-plant system. Novosibirsk: Nauka, 1991. 150 p. (in Russian).
20. Alekseenko V.A., Alekseenko A.V. The Clarke numbers of chemical elements in the urban landscapes soils. Rostov-na-Donu: izdatelstvo Yuzhnogo federalnogo universiteta, 2013. 381 p. (in Russian).
21. Morozov V.N., Hadarcev A.A. To modern treatment of stress mechanisms // *Vestnik novyh medicinskih tekhnologiy*. 2010. V. XVII. No. 1. P. 15–17 (in Russian).
22. Preiser J.C., Ichai C., Orban J.C., Groeneveld A.B.J. Metabolic response to the stress of critical illness // *British Journal of Anaesthesia*. 2014. V. 113. No. 6. P. 945–954. doi: 10.1093/bja/aeu187

Юбилей Василия Алексеевича Сысуева



Коллектив редколлегии журнала «Теоретическая и прикладная экология» сердечно поздравляет академика РАН, доктора технических наук, профессора Василия Алексеевича Сысуева с Юбилеем!

Василий Алексеевич – выдающийся учёный в области механизации сельского хозяйства, автор множества научных публикаций и изобретений, член Отделения сельскохозяйственных наук РАН, удостоен Почётного звания «Заслуженный деятель науки и техники РФ», награждён серебряными медалями и дипломами ВВЦ, Почётной грамотой Совета Федерации Федерального Собрания Российской Федерации.

Возглавив в далёком 1990 г. Зональный НИИ сельского хозяйства Северо-Востока им. Н.В. Рудницкого, Василий Алексеевич в короткий срок стал признанным лидером аграрной науки Евро-Северо-Востока. Ему удалось в нелёгкие «перестроечные» годы развить новые направления исследований, создать сплочённый коллектив учёных-единомышленников, добиться ощутимых результатов в деятельности научных учреждений региона. По его инициативе и при непосредственном участии был успешно реализован интеграционный проект создания Федерального аграрного научного центра Северо-Востока имени Н.В. Рудницкого. В настоящее

время Василий Алексеевич является научным руководителем объединённой организации.

Сферу научных интересов Василия Алексеевича отличает широта и многогранность. Под его руководством разработаны не только энергосберегающие и высокоэффективные технологии и технические средства, не уступающие лучшим зарубежным аналогам (дернинные сеялки, измельчители грубых кормов, дробилки, плющилки зерна и другое оборудование), но и подходы к повышению агробиоэнергетической эффективности растениеводства, осуществляются исследования, направленные на обеспечение устойчивого производства и многофункционального использования зерна озимой ржи. Василий Алексеевич внёс существенный вклад в развитие фундаментальных основ механизации животноводства и совершенствование методов теоретической механики, в обоснование процессов работы сельскохозяйственной техники, методологию разработки теории системы сельскохозяйственных машин.

Особое внимание на протяжении всей своей деятельности Василий Алексеевич уделяет подготовке молодых учёных и аспирантов, руководит работой Диссертационного совета при ФГБНУ ФАНЦ Северо-Востока, является главным редактором научного журнала «Аграрная наука Евро-Северо-Востока», членом редколлегии журналов «Теоретическая и прикладная экология», «Достижения науки и техники АПК», «Сельский механизатор». Василия Алексеевича знают как талантливого учёного, прекрасного организатора и мудрого руководителя не только в нашей стране, но и за рубежом. Его научные труды изданы в Чехии, Польше, Китае, Болгарии, Бельгии, Турции, Египте, Венгрии, Беларуси, Украине. В знак признания выдающегося вклада в процесс модернизации Китая и развитие китайско-российского научного сотрудничества Василий Алексеевич удостоен в декабре 2022 г. высшей награды Правительства Китая для зарубежных специалистов – Премии Дружбы.

Мы искренне желаем Василию Алексеевичу крепкого здоровья, долгих лет жизни, творческих успехов, большого человеческого счастья и благополучия!

*Главный редактор Т. Я. Ашихмина
и редколлегия журнала
«Теоретическая и прикладная экология»*

Журналу «Теоретическая и прикладная экология» исполнилось 15 лет

Исполнилось 15 лет со дня выхода первого номера научного журнала «Теоретическая и прикладная экология». В связи с этим 22 декабря 2022 г. коллектив редколлегии журнала в Областной библиотеке имени А.И. Герцена провёл творческую встречу с авторами и читателями журнала, научной общественностью, студентами, магистрантами, аспирантами, преподавателями вузов г. Кирова.

О становлении журнала, его роли в научной и информационной жизни региона выступила Е.А. Чемоданова – главный библиотекарь отдела обслуживания, руководитель Центра экологической информации и культуры. О научном и творческом развитии журнала, достигнутых успехах и результатах, формировании научных связей с НИИ и вузами страны, роли членов редколлегии, огромной помощи рецензентов, активности авторского коллектива рассказала главный редактор журнала Т.Я. Ашихмина.

Установлены и развиваются творческие связи журнала с Институтом биологии и Институтом химии ФИЦ Коми НЦ УрО РАН, Вятским государственным университетом, Федеральным аграрным научным центром Северо-Востока им. Н.В. Рудницкого, Вятским государственным агротехнологическим университетом, Всероссийским научно-исследовательским институтом охотничьего хозяйства и звероводства имени профессора Б.М. Житкова, Московским государственным университетом имени М.В. Ломоносова, Российским химико-технологическим университетом имени Д.И. Менделеева, Московским государственным университетом геодезии и картографии, Башкирским государственным университетом, Пермским национальным исследовательским политехническим университетом, Саратовским государственным техническим университетом имени Гагарина Ю.А. и многими другими НИИ и вузами. Учёные данных учреждений являются активными авторами, рецензентами материалов, которые поступают для публикации в журнале.

Было отмечено, что журнал «Теоретическая и прикладная экология» включён в коллекцию лучших российских журналов (931 журнал), входящих в базу актуальной библиометрической информации от крупнейших международных и отечественных

агрегаторов научной информации Russian Science Citation Index (RSCI) на платформе Web of Science и ему присвоен квартиль Q2. Наряду с этим журнал входит в отечественную базу научного цитирования РИНЦ и его ядро. 6 декабря 2022 г. ВАК присвоила журналу категорию К2, но на основании рекомендации ВАК Минобрнауки России (от 06.12.2022, № 02-1198) журналы, входящие в международные базы данных и в перечень журналов RSCI, приравниваются к изданиям категории К1, публикация в которых рекомендована при защите кандидатских и докторских диссертаций. В связи с этим на основании рекомендации ВАК журнал «Теоретическая и прикладная экология» соответствует категории К1, так как входит в международные наукометрические базы данных Scopus и Web of Science Core Collection, Ulrich's Periodicals Directory, Google Scholar и RSCI.

Большой вклад в деятельность редколлегии журнала вносят заместители главного редактора И.Г. Широких, Л.И. Домрачева, С.В. Дёгтева, секретари журнала С.Г. Скугорева, Т.И. Кутявина, В.В. Рутман, члены редколлегии Л.В. Кондакова, Е.В. Дабах, Г.Я. Кантор, С.В. Пестов. Уникальным дизайном обложек журнал обязан профессиональному мастерству фотографа А.А. Широких.

Участников творческой встречи поприветствовали и поздравили редколлегию журнала заместители Председателя Правительства Кировской области А.А. Маури и С.В. Шумайлова, министр охраны окружающей среды А.В. Албегова, ректор Вятского государственного университета В.Н. Пугач, директор Института биологии Коми НЦ УрО РАН И.Ф. Чадин, заместитель директора Областной библиотеки им. А.И. Герцена С.Н. Будашкина, вице-президент Вятской торговой промышленной Палаты Л.И. Перминов, руководитель Федерального аграрного научного центра Северо-Востока им. Н.В. Рудницкого И.А. Устюжанинов, руководитель Центра лабораторного анализа и технических измерений по Кировской области В.П. Пересторонин, генеральный директор АО «Куприт» И.М. Гизатуллин, генеральный директор создаваемого Экотехнопарка «Мирный» А.Г. Свирский, руководитель публикационного отдела Вятского государственного университета Л.К. Патрушева.

С тёплыми словами благодарности выступили от авторского коллектива журнала учёные Вятского государственного агротехнологического университета во главе с профессором В.А. Лихановым, Центра компетенций «Экологические системы и технологии» ВятГУ во главе с руководителем А.В. Сазановым, профессор НИИ звероводства и охотничьего хозяйства В.В. Ширияев, доцент Кировского государственного медицинского университета Е.П. Колеватых.

Большую роль в жизни журнала играет издательская организация, которая готовит журнал к печати и издаёт журнал. С первого выпуска журнала и до сегодняшнего дня бесменным издателем журнала является ООО «О-Краткое». Директор Издательства ООО «О-Краткое» Е.М. Дрогов и директор Кировской цифровой типографии Н.В. Плюснин поблагодарили редакцию журнала за многолетнее творческое сотрудничество.

В адрес редакции журнала поступило много приветствий и поздравительных адресов от учредителя журнала Издательского дома «Камертон» (В.А. Лобковский, Б.И. Кочуров),

от Института химии ФИЦ Коми НЦ УрО РАН (директор С.А. Рубцова), от заслуженного профессора МГУ имени М.В. Ломоносова В.С. Петросяна, профессора МГУ имени М.В. Ломоносова В.А. Тереховой, проректора по международным отношениям РХТУ им. Д.И. Менделеева И.В. Ерёмину, профессора Саратовского государственного технического университета им. Ю.А. Гагарина Е.И. Тихомировой, профессоров Вятского фенологического центра А.Н. Соловьёва и Т.Г. Шиховой.

В ходе встречи от редакции были вручены грамоты, благодарственные письма наиболее активным членам редколлегии, экспертам и авторам публикаций. Прошло обсуждение дальнейшего развития журнала по повышению его рейтинга в научных базах, расширению международного сотрудничества.

*Главный редактор журнала,
доктор технических наук, профессор
Т. Я. Ашихмина*

Уважаемые коллеги!

Приглашаем Вас принять участие в работе
**XVIII Всероссийской научно-практической конференции
с международным участием**
«Экология родного края: проблемы и пути их решения»
г. Киров, 24–25 апреля 2023 г.

Основные направления работы конференции:

- Экологические проблемы региона
- Экологический мониторинг состояния окружающей среды
- Химия и экология почв
- Экология микроорганизмов
- Биология и экология растений
- Биология и экология животных
- Цифровые технологии в экологии
- Отходы производства и потребления: экологические аспекты
- Экологическое образование, воспитание, просвещение

В рамках конференции будет проходить региональный молодёжный конкурс, посвящённый 650-летию г. Кирова «Мой любимый город».

Организаторы конференции: Вятский государственный университет,
Институт биологии Коми научного центра
Уральского отделения Российской академии наук.

Контакты: <http://envjournal.ru/ecolab/knf.php>,
e-mail: confbioeco@gmail.com,
тел. 8(8332)37-02-77.

15 ЛЕТ ЖУРНАЛУ «ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ И ПРИКЛАДНАЯ ЭКОЛОГИЯ»



Индекс ПС248



ISSN 1995-4301



9 771995 430004