



2019

*Теоретическая
и прикладная*

ЭКОЛОГИЯ

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

№ 3

Theoretical and
Applied Ecology



**ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ
ПРОБЛЕМЫ
ЭКОЛОГИИ**

**МЕТОДОЛОГИЯ
И МЕТОДЫ
ИССЛЕДОВАНИЙ.
МОДЕЛИ
И ПРОГНОЗЫ**

**МОНИТОРИНГ
АНТРОПОГЕННО
НАРУШЕННЫХ
ТЕРРИТОРИЙ**

**ЭКОЛОГИЗАЦИЯ
ПРОИЗВОДСТВА**

АГРОЭКОЛОГИЯ

**СОЦИАЛЬНАЯ
ЭКОЛОГИЯ**

**ПОПУЛЯЦИОННАЯ
ЭКОЛОГИЯ**

ЭКОТОКСИКОЛОГИЯ

НАУЧНЫЙ ЖУРНАЛ

<http://envjournal.ru>

Заповедник «Нургуш» организован в 1994 г. 25 мая 2019 г. коллектив сотрудников отметил 25-летие заповедника. Территория заповедника состоит из двух участков: «Нургуш» в Котельничском и «Тулашор» в Нагорском районах Кировской области. Общая площадь заповедника 23,4 тыс. га, что составляет 0,02% территории Кировской области, охранной зоны – 25,5 тыс. га.



УНИКАЛЬНЫЙ ЗАПОВЕДНИК КИРОВСКОЙ ОБЛАСТИ «НУРГУШ»



*Директор заповедника «Нургуш»
Тарасова Елена Михайловна*

Четверть века сотрудники государственного природного заповедника «Нургуш» сохраняют уникальный уголок вятской природы. Под пологом тайги и хвойно-широколиственных лесов, на обширных пойменных лугах и в таинственной глубине стариц обитают свыше пяти тысяч видов флоры и фауны, в том числе 107 видов из Красной книги России и Кировской области: выхухоль, северный олень, орлан-белохвост, филин, белая куропатка, кулик-сорока, серая неясыть, скопа, восковик-отшельник, аполлон, мнемозина, надбородник безлистный, венерин башмачок настоящий, тайник сердцевидный, калипсо луковичная, лобария лёгочная, полипорус зонтичный и другие. Обилию редких и охраняемых видов способствует режим строгой охраны территории заповедника.

Название «Нургуш» было предложено известным вятским краеведом и натуралистом А.Д. Фокиным. В июле 1952 г. он обследовал часть Глушковской лесной дачи Вишкильского лесничества Котельничского лесхоза и рекомендовал эту территорию под охотничий заказник, который был организован в 1954 г. В заказнике акклиматизировали ондатру и енотовидную собаку, реакклиматизировали выхухоль и речного бобра. Благодаря заказнику здесь сохранились нетронутыми пойменные старовозрастные леса.

Участок «Нургуш» стал заповедным в 1994 г. Его красота и гордость – 80 пойменных озёр, каждое из которых имеет неповторимый облик. Озёра являются местом гнездования огромного количества водоплавающих птиц. Весной, в половодье, заповедник превращается в крупнейшее нерестилище среднего течения р. Вятки. Летом на высоких пойменных гривах подрастают лосята и медведи. На протоках возводят плотины бобры. На огромной сосне уже несколько десятков лет гнездятся орланы-белохвосты.

Участок «Тулашор» присоединён к заповеднику в 2010 г. Древняя тайга ни разу

не вырубалась и сохранилась до наших дней в своем первозданном виде. Возраст её достигает 180 лет. Стволы елей покрыты длинными бородами лишайников. На осинах в изобилии произрастают лобария лёгочная и неккера перистая – индикаторы старовозрастных не нарушенных лесов. Здесь обитают волки и медведи, россомахи и лоси, с севера заходят северные олени. По окраинам болот держатся белые куропатки.

Заповедник не только обеспечивает стабильность природных комплексов, но и активно развивается. Научные сотрудники, совместно с коллегами из ведущих научных учреждений страны, выполняют работы по комплексному экологическому мониторингу биоты, с 1995 г. ведут многолетние ряды наблюдений по 51 параметру. Не случайно именно коллективу заповедника были доверены подготовка второго издания Красной книги Кировской области и работы по оптимизации региональной системы особо охраняемых природных территорий Кировской области.

Большую работу заповедник проводит по экологическому просвещению населения. За последние десять лет здесь созданы четыре экологические тропы, два музея («Нургуш» и «Логово Йети») и эколого-этнографический комплекс «Парга». Каждый год выпускается до 10000 единиц сувенирной и полиграфической продукции. На экскурсиях, выставках, экологических праздниках и акциях, организуемых заповедником, с миром нетронутой природы ежегодно знакомится более 5000 человек.

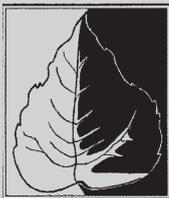
Впереди у коллектива заповедника большие планы. Необходимо провести инвентаризацию редких и малоизученных групп живых организмов, обновить и дополнить экспозиции музеев, достроить комплекс гостевых домиков. Создать базу для развития экологического просвещения и познавательного туризма на участке «Тулашор», где в настоящее время заканчивается инвентаризация флоры и фауны.

Заповедник «Нургуш» <https://nurgush.org/>

Киров, ул. Ленина, 129а, корпус 2

тел./факс 8 (8332) 67-68-69, 67-93-18

E-mail: zapovednik@nurgush.org



**Теоретическая
и прикладная
ЭКОЛОГИЯ**
№ 3, 2019
<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 (№ 2022 по состоянию на 18.07.2019).

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 Издательский дом «Камертон», ФГБОУ ВО «Вятский государственный университет».

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

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

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

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

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

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

Технические секретари

Т.И. Кутявина, к.б.н., старший научный сотрудник Вятского государственного университета,
А.С. Тимонов, научный сотрудник Института биологии Коми НЦ УрО РАН

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

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

Издание зарегистрировано Федеральной службой по надзору в сфере связи, информационных технологий и массовых коммуникаций. Регистрационный номер и дата принятия решения о регистрации: серия ПИ № ФС77-74434 от 23 ноября 2018 г. Подписные индексы 82027, 48482 в каталоге Агентства «Роспечать». Зарубежная подписка оформляется через фирмы-партнёры ЗАО «МК-ПЕРИОДИКА» по адресу: 129110, г. Москва, ул. Гиляровского, 39, тел.: (495) 281-91-37, 281-97-63. E-mail: info@periodicals.ru; <http://www.periodicals.ru>

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

Подписано в печать 20.09.2019. Тираж 1150 экз. Заказ № 901.

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

ЧЛЕНЫ РЕДАКЦИОННОЙ КОЛЛЕГИИ:

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



*Theoretical
and applied*
ECOLOGY
No. 3, 2019

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, Vyatka State University, Institute of Biology of the

Komi Science Centre of the Ural Branch of RAS

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

Doctor in Biology, Professor of Vyatka State Agricultural Academy

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

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

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

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

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

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

Executive Secretary S.G. Skugoreva,

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

Technical Secretaries:

T.I. Kutyavina, PhD in Biology,

senior researcher of Vyatka State University,

A.S. Timonov, researcher of Institute of Biology of the Komi Science Centre of the Ural Branch of RAS

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

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

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

The edition is registered by Federal service for supervision in the sphere of communication, information technology and mass communications. Registration number and date of the decision on registration: series PI No. FS77-74434 on November 23, 2018.

Subscription index 82027, 48482
in the catalogue of Agency "Rospechat".

To effect subscription it is necessary to address to one of the partners of JSC "MK-Periodica" in your country or to JSC "MK-Periodica" directly.

Address: 39, Gilyarovskiy St., Moscow, Russia, 129110.

Tel: (495) 281-91-37, 281-97-63, Fax: (495) 281-37-98

E-mail address: info@periodicals.ru. <http://www.periodicals.ru>

Prepared for publication by the publishing house of "O-Kratkoe"

2, Dnamoskiy proezd, Kirov, 610000

Tel. +7 (8332) 32-28-39. E-mail: okrat@okrat.ru.

Designer – Tatiana Korshunova. Cover photo – Aleksandr Shirokikh.

Translation – Grigoriy Kantor. Administrator of Web site –

Vyacheslav Rutman. Managing editor – Mariya Zelayeva

Director of the publishing house "O-Kratkoe" Evgeniy Drogov

© Publishing house "O-Kratkoe"

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

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

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

СОДЕРЖАНИЕ

ОБЗОРЫ

- Ю. А. Пулянов, А. А. Чибилёв** Экологизация степных агротехнологий в условиях природных и антропогенных изменений окружающей среды 5
- S. V. Zagirova, O. A. Mikhailov, Ju. Schneider** Carbon dioxide, heat and water vapor exchange in the boreal spruce and peatland ecosystems 12

СТАТЬИ

- В. В. Беленко** Мониторинг объектов природно-экологического каркаса застраиваемых территорий по материалам космических съёмок 21
- Т. И. Кутявина, В. В. Рутман, Т. Я. Ашихмина, В. П. Савиных** Использование космических снимков для определения границ водоёмов и изучения процессов эвтрофикации 28
- Е. В. Товстик, Т. А. Адамович, Т. Я. Ашихмина** Идентификация участков массового роста борщевика Сосновского с помощью спектральных индексов по данным Sentinel-2 34

- Г. Я. Елькина, С. В. Денева, Е. М. Лаптева** Тяжёлые металлы в системе почва–растение в биогеоценозах Большеземельской тундры 41
- И. О. Катин, В. А. Нестеренко, В. А. Дубина** Влияние морского мусора на местообитания ластоногих в Японском море 48
- С. Г. Скугорева, Т. И. Кутявина, С. Ю. Огородникова, Л. В. Кондакова, В. С. Симакова, А. Л. Блинова, Ю. Н. Зыкова, Л. И. Домрачева, Т. Я. Ашихмина** Комплексный подход в оценке экологического состояния городских почв 57

- М. В. Рябухина, Р. Г. Калякина, Э. Н. Рябинина, Р. А. Майский** Генетическое разнообразие популяций сосны обыкновенной *Pinus sylvestris* L. 66
- Я. И. Назарова, И. Г. Широких, А. В. Бакулина, Е. Н. Баранова, Т. Я. Ашихмина** Идентификация двух ризосферных изолятов стрептомицетов и изучение *in vitro* их колонизирующей активности 72

- А. Marchuk, V. A. Likhanov, O. P. Lopatin** Alternative energy: methanol, ethanol and alcohol esters of rapeseed oil as eco-friendly biofuel 80
- С. Л. Фукс, С. В. Хитрин, С. В. Девятерикова** Переработка отходов фторопластов в ультрадисперсный политетрафторэтилен для получения смазок и защитных покрытий 87
- Э. И. Рахимова, А. С. Сироткин** Экологические аспекты в производстве майонеза 95

- А. И. Фокина, Е. И. Лялина, Л. В. Трефилова, Т. Я. Ашихмина** Отклик почвенной цианобактерии *Nostoc paludosum* на действие сульфата меди (II) в присутствии глутатиона восстановленного ... 101
- Т. С. Дроганова, Л. В. Поликарпова, А. С. Коничев** Белковые спектры печени живородки речной в норме и при интоксикации ионами свинца (II) 109
- А. К. Минеев, О. В. Минеева** Гистопатологии печени у рыб Саратовского водохранилища 114
- О. А. Куликова, В. А. Терехова, Е. А. Мазлова, Ю. А. Нишкевич, К. А. Кыдралиева** Экотоксикологические характеристики нефтезагрязнённых грунтов (шламов) после их реагентной обработки 120

- Д. В. Виноградов, В. М. Василева, М. П. Макарова, Б. И. Кочуров, Е. И. Лупова** Агроэкологическое действие осадка сточных вод и его смесей с цеолитом на агроценозы масличных культур 127
- Ю. Н. Терентьев, Н. В. Сырчина, Т. Я. Ашихмина, Г. Я. Кантор** Состав и технология производства серного удобрения с активированным торфом и глауконитовым эфедем 134

- Р. Н. Салиева, В. З. Латыпова, И. Р. Салиев** Экологическое оздоровление и сохранение уникальной водной системы реки Волги: вопросы законодательного обеспечения 142

ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ
ПРОБЛЕМЫ
ЭКОЛОГИИ

МЕТОДОЛОГИЯ
И МЕТОДЫ
ИССЛЕДОВАНИЙ.
МОДЕЛИ И
ПРОГНОЗЫ

МОНИТОРИНГ
ПРИРОДНЫХ
И АНТРОПОГЕННО
НАРУШЕННЫХ
ТЕРРИТОРИЙ

ПОПУЛЯЦИОННАЯ
ЭКОЛОГИЯ

ЭКОЛОГИЗАЦИЯ
ПРОИЗВОДСТВА

ЭКОТОКСИКОЛОГИЯ

АГРОЭКОЛОГИЯ

СОЦИАЛЬНАЯ
ЭКОЛОГИЯ

CONTENTS

REVIEWS

THEORETICAL PROBLEMS OF ECOLOGY

- Yu. A. Gulyanov, A. A. Chibilev** Ecologization of steppe agrotechnologies in the conditions of natural and anthropogenic environmental changes5
- S. V. Zagirova, O. A. Mikhailov, Ju. Schneider** Carbon dioxide, heat and water vapor exchange in the boreal spruce and peatland ecosystems12

ARTICLES

METHODOLOGY AND RESEARCH METHODS. MODELS AND FORECASTS

- V. V. Belenko** Monitoring of objects of the natural-ecological framework of the undeveloped territories based on satellite imagery21
- T. I. Kut'yavina, V. V. Rutman, T. Ya. Ashikhmina, V. P. Savinykh** The use of satellite images to determine the boundaries of water bodies and study the processes of eutrophication28
- E. V. Tovstik, T. A. Adamovich, T. Ya. Ashikhmina** Identification of sites of mass growth of *Heracleum sosnowskyi* Manden. using spectral indices according to Sentinel-2 images34

MONITORING OF NATURAL AND ANTHROPOGENICALLY DISTURBED AREAS

- G. Ya. El'kina, S. V. Deneva, E. M. Lapteva** Heavy metals in soil-plant system in biogeocenoses of the Bolshezemelskaya Tundra41
- I. O. Katin, V. A. Nesterenko, V. A. Dubina** The impact of marine debris on pinniped habitats in the Sea of Japan48
- S. G. Skugoreva, T. I. Kut'yavina, S. Yu. Ogorodnikova, L. V. Kondakova, V. S. Simakova, A. L. Blinova, Yu. N. Zykova, L. I. Domracheva, T. Ya. Ashikhmina** Integrated approach to environmental assessment of urban soil57

POPULATION ECOLOGY

- M. V. Ryabukhina, R. G. Kalyakina, Z. N. Ryabinina, R. A. Maiski** Genetic diversity of *Pinus sylvestris* L. pine populations ...66
- Y. I. Nazarova, I. G. Shirokikh, A. V. Bakulina, Y. N. Baranova, T. Y. Ashikhmina** Identification of two strains of streptomycetes from the rhizosphere and in vitro study of their colonizing activity72

GREENING OF PRODUCTION

- A. Marchuk, V. A. Likhanov, O. P. Lopatin** Alternative energy: methanol, ethanol and alcohol esters of rapeseed oil as eco-friendly biofuel80
- S. L. Fuks, S. V. Khitrin, S. V. Devyaterikova** Processing of fluoroplast waste to ultradisperse polytetrafluoroethylene for obtaining lubricants and protective coatings87
- E. I. Rakhimova, A. S. Sirotkin** Environmental aspects in the production of mayonnaise..... 95

ECOTOXICOLOGY

- A. I. Fokina, E. I. Lyalina, L. V. Trefilova, T. Ya. Ashikhmina** The response of soil cyanobacteria *Nostoc paludosum* to the effect of copper(II) sulfate in the presence of the restored glutathione 101
- T. S. Drozanova, L. V. Polikarpova, A. S. Konichev** River snail liver protein spectrum in normal conditions and when intoxicated with lead(II) ions 109
- A. K. Mineev, O. V. Mineeva** Histopathology of fishes' liver in the Saratov reservoir 114
- O. A. Kulikova, V. A. Terekhova, E. A. Mazlova, Yu. A. Nishkevich, K. A. Kydraliev** Ecotoxicological characteristics of oil-contaminated soils (sludges) after their reagent treatment 120

AGROECOLOGY

- D. V. Vinogradov, V. M. Vasileva, M. P. Makarova, B. I. Kochurov, E. I. Lupova** Agroecological effect of sewage sludge and its mixtures with zeolite on the agrocenoses of oilseeds 127
- Yu. N. Terentyev, N. V. Syrchina, T. Ya. Ashikhmina, G. Ya. Kantor** Natural sulfur fertilizer with activated peat and glauconitic efel 134

SOCIAL ECOLOGY

- R. N. Salieva, V. Z. Latypova, I. R. Saliev** Ecological improvement and preservation of the unique water system of the Volga River: issues of legislative support 142

Экологизация степных агротехнологий в условиях природных и антропогенных изменений окружающей среды

© 2019. Ю. А. Гулянов, д. с.-х. н., профессор, с. н. с.,
А. А. Чибилёв, д. г. н., академик РАН,

Институт степи Оренбургского федерального исследовательского центра
Уральского отделения Российской академии наук,
460000, Россия, г. Оренбург, ул. Пионерская, д. 11,
e-mail: orensteppe@mail.ru

История земледелия тесно связана с интенсивной эксплуатацией природных ресурсов, повсеместным вовлечением в оборот дополнительных площадей, без учёта оптимального соотношения угодий и устойчивости нарушенных природных ландшафтов.

Практикуемые многие десятилетия традиционные технологии в земледелии из-за значительных антропогенных нагрузок на агроландшафты привели к деградации пахотных угодий, повышению засушливости территории, снижению продуктивности агроценозов, истощению биологического разнообразия.

В настоящей обзорной статье рассматривается стратегия новационного природопользования, ориентированная на существенную корректировку структуры сельскохозяйственных угодий степной зоны путём выделения элитного земельного фонда для высокоприбыльного экологически чистого производства растениеводческой продукции и особо ценных почвенных эталонов, как элементов природно-заповедного фонда. Обсуждается возможность экологизации сельского хозяйства путём перехода на ландшафтно-адаптивные системы земледелия и ресурсосберегающие технологии в растениеводстве. Применение ресурсосберегающих технологий в степном землепользовании открывает новые возможности для обеспечения продовольственной безопасности страны и сохранения биологического разнообразия.

Ключевые слова: природные ландшафты, деградация почв, новационное природопользование, экологизация земледелия, ресурсосберегающие агротехнологии.

Ecologization of steppe agrotechnologies in the conditions of natural and anthropogenic environmental changes

© 2019. Yu. A. Gulyanov ORCID: 0000-0002-5883-349X
A. A. Chibilev ORCID: 0000-0002-6214-1437

Institute of Steppe of the Orenburg Federal Research Center
of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences,
11, Pionerskaya St., Orenburg, Russia, 460000,
e-mail: orensteppe@mail.ru

The history of farming is closely connected with the intensive exploitation of natural resources, the widespread involvement of additional areas into circulation, without taking into account the optimal balance of land and the stability of disturbed natural landscapes.

The traditional technologies practiced for many decades in agriculture have led to the degradation of arable land, increased aridity of the territory, reduced productivity of agrocenosis, depletion of biological diversity due to the significant anthropogenic pressures on agricultural landscapes. This review article substantiates the possibility of developing and introducing agricultural technologies based on the latest scientific achievements, ensuring an effective response to great challenges without multiplying anthropogenic pressures on the environment and increasing risks to the lives and health of citizens, eliminating the inefficient use of natural resources that threatens their reproduction. The article discusses the strategy of environmental management, focused on a significant adjustment of the agricultural structure in the steppe biome by identifying an elite land fund for highly profitable, environmentally friendly crop production and especially valuable soil etalons as elements of the natural reserve fund. Nature management in the steppe zone should be founded on the technologies that are based on imitation of natural processes and aimed at preserving the sustainability of landscape and biological diversity.

The article discusses the possibility of ecologization of steppe agrotechnology through the transition to landscape-adaptive farming systems and resource-saving technologies in crop production that involve the differentiated use of agricultural land, control over their composition and ratio depending on the state of the landscape. To achieve these goals, contour-landscape organization of agricultural land is recommended, introducing soil protection crop rotations

with a high proportion of perennial grasses, technologies of direct mulch sowing, postharvest and green manure crops, phytomelioration, belts of trees and bushes, steppe lanes and corridors.

The use of resource-saving technologies in steppe land use opens up new opportunities for ensuring the country's food security and preserving biological diversity.

Keywords: natural landscapes, soil degradation, innovative nature management, ecologization of agriculture, resource-saving agrotechnologies.

Природные ресурсы во все времена часто становились «яблоком раздора», предметом множества военных конфликтов, приводящих к их хищническому истреблению и деградации экосистем [1–5].

Ресурсный кризис XXI века связан с истощением запасов питьевой воды, деградацией пахотных земель, истреблением лесов и сокращением других ресурсов биосферы Земли, крайне необходимых для сохранения биологического разнообразия и продолжения жизни на планете [6].

Выход из сложившейся ситуации видится в смене парадигмы развития существующей цивилизации, переходе на природосберегающие технологии, направленные на восстановление естественного самосогласованного ресурсооборота нашей планеты [6].

В области сельскохозяйственного производства речь идёт о разработке и внедрении агротехнологий, основанных на новейших достижениях науки, обеспечивающих эффективное реагирование на большие вызовы без возрастания антропогенных нагрузок на окружающую среду и повышения рисков для жизни и здоровья граждан, исключающих неэффективное использование природных ресурсов, угрожающее их воспроизводству [7].

Почвозатратные антиландшафтные технологии в сельском хозяйстве и деградация земель. Хорошо гумусированные плодородные почвы долин и старых русел давно исчезнувших водных бассейнов довольно долго обеспечивали процветание цивилизаций до исторического человека [8–10]. Однако уже в древние века почвы большинства сельскохозяйственных угодий подвергались эрозии [11]. В настоящее время по оценкам экспертов деградация охватила примерно треть мировых почвенных ресурсов [12–14].

За всю историю земледелия человечество потеряло около 2 млрд га плодородных земель, это больше, чем вся оставшаяся площадь (1,5 млрд га). Современная убыль плодородных почв составляет до 15 млн га в год [12–14].

Деградационные процессы в России особенно характерны для почв земледельческих регионов степной и лесостепной зон европей-

ской части и прослежены нами на примере Оренбургской области.

Применяемые многие десятилетия экстенсивные системы земледелия носили в основном почвозатратный и антиландшафтный характер. Они препятствовали адаптации земледелия к почвенно-климатическим и ландшафтным условиям, приводили к значительным антропогенным нагрузкам и деградации угодий, сопровождалась повышением засушливости территории, снижением продуктивности полей, лугов и пастбищ [15].

Экстенсификация земледелия выразилась прежде всего в дополнительном вовлечении в пашню в «целинную компанию» 1954–1963 гг. 1,8 млн га земельных угодий со слабой устойчивостью к воздействию деградационных процессов. В результате эродированные и потенциально опасные к эрозии почвы охватывают в Оренбургской области 8,3 млн га, из них 5,3 млн га пашни. Две трети пашни области расположены на склонах от 2 до 7° и нуждаются в защитных противоэрозионных мероприятиях [15]. В условиях малоснежных зим при слабой облесённости равнинных пространств, активизируются зимние пыльные бури, сопровождающиеся сносом верхнего плодородного слоя с распаханых земель [16].

К сожалению, проблемы, порождаемые деградацией почв, до сих пор так и остаются нерешёнными [17]. Для предотвращения разрушения почв и восстановления плодородия, особенно на маргинальных землях, необходимо проведение комплекса почвозащитных и почвовосстановительных мероприятий. При этом в защите от дальнейшего разрушения, «щадящем» использовании и восстановлении почвенного плодородия нуждаются, в первую очередь, земли сельскохозяйственного назначения, от качества и осмысленного использования которых зависят устойчивое развитие, экологическая и продовольственная безопасность страны [18].

Роль агротехнологий, базирующихся на подражании естественным природным процессам, в формировании устойчивых степных агроландшафтов. Экологизация сельскохозяйственного использования земель

и оптимизация агроландшафтов относятся к числу ключевых проблем степного природопользования. Научное решение этих проблем в области степной агроэкологии предполагает существенное нормирование нагрузки на ландшафт при различных видах сельскохозяйственного освоения [19].

Природопользование в степной зоне следует осуществлять на основе технологий, основанных на подражании естественным природным процессам и направленным на сохранение устойчивости и оптимума ландшафтного и биологического разнообразия [20]. При таком подходе к агротехнологиям, исключая глубокую обработку почвы с оборотом пласта, внесение высоких доз минеральных удобрений и пестицидов, применение ГМО, поддерживается экологическая стабильность природных и сельскохозяйственных экосистем, обеспечивается длительное неистощительное и эффективное использование природного почвенного потенциала [21–23].

Применение биологических приёмов восстановления ресурсов в агроценозах повышает плодородие почвы, защищает её от загрязнения, сохраняет биоразнообразие [22–23]. В этой связи, подбор и научное обоснование заимствованных у природы приёмов неразрушительного использования ресурсов биосферы может не только обеспечить продовольственную безопасность растущего населения, но и сохранить биоразнообразие на видовом и популяционном уровнях.

Оптимизация структуры сельскохозяйственных угодий и противозерозионная организация территории. В степных и особенно в постцелинных регионах остро стоит проблема оптимизации существующей структуры землепользования, решение которой предполагает дифференциацию земель сельскохозяйственного назначения на высокоплодородный земельный фонд и наиболее ценные в ландшафтном отношении местности и урочища. Предполагает первоочередную оптимизацию площади средостабилизирующих угодий, в которую и «встраивается» оптимальная площадь пашни [19, 24].

Изменение структуры сельскохозяйственных угодий позволит временно консервировать малопродуктивные и маловостребованные пахотные земли, предоставит возможность развивать на них пастбищное или сенокосное землепользование путём организации оборота угодий «поле – залежь – молодая степь – зрелая степь – климаксная степь – поле» [20].

На практике экологизация земледелия означает переход на ландшафтно-адаптивные системы, предполагающие углублённую дифференциацию существующих систем применительно к различным типам местности, включая дифференцированное использование сельскохозяйственных угодий, контроль над их составом и соотношением в зависимости от состояния ландшафта, а также контурную обработку почвы на всех склоновых участках.

Контурно-ландшафтная организация сельхозугодий предусматривает контурную безотвальную обработку почвы с сохранением на поверхности стерни и пожнивных остатков, почвозащитные севообороты с контурно-полосным размещением многолетних трав, однолетних культур, пара и контурное размещение водорегулирующих лесополос, древесных и кустарниковых кулис, приовражных и прибалочных лесных насаждений [25].

Кулисы из кустарников служат средоулучшающей культурой, хорошо поглощают талые и дождевые воды, способствуют накоплению влаги и предотвращают вынос питательных веществ за границы полей, практически полностью останавливают водную и ветровую эрозию [26].

Кулисы из сахарного сорго, за счёт формирования неполегающей гибкой аэродинамической решётки, на 30–35% снижают скорость ветра в приземном слое воздуха, на 30–40% уменьшают испарение почвенной влаги, эффективно собирают снег, равномерно распределяют его в межполосном пространстве. При этом уменьшается глубина промерзания почвы (на 30–40 см), замедляется скорость таяния снега, снижается интенсивность стока, обеспечивается более эффективное впитывание талых вод и защита от эрозии, активизируется почвенная биота [27].

Не менее важна роль кулис как дополнительного источника органики в виде мульчепласта из измельчённых стеблей кустарников (под пропашные культуры) и высокостебельных травянистых растений (под культуры сплошного сева). Велико значение кустарниково-травянистых мозаичных фитоценозов и в поддержании биоразнообразия, формировании убежищ для птиц, млекопитающих, насекомых, редких и исчезающих видов растений [26].

В степной зоне лесополосы и кулисы должны дополняться созданием степных полос и коридоров, обеспечивающих оптимальный водный и экологический баланс.

Таким образом, противоэрозийная организация территории и ландшафтно-адаптивные системы земледелия предполагают оптимизацию соотношения пашни, лугов, леса и водной поверхности в структуре земель сельскохозяйственного назначения и детальную привязку агротехнических мероприятий в земледелии к местным условиям.

Внедрение почвозащитных и почвовосстановительных севооборотов. Вполне очевидно, что экологизация земледелия невозможна без биологических и экологических факторов оптимизации, таких как сбалансированность севооборотов, адаптивное районирование и разнообразие видов и сортов растений [28].

К основным приемам экологической оптимизации севооборотов относятся адаптивное размещение сельскохозяйственных культур по типам местности и их дифференциация в соответствии с агроэкологическими требованиями и средообразующим влиянием; оптимизация (как правило, повышение) доли многолетних трав, смешанных культур, чистых и занятых паров, в том числе с сидеральными культурами. Не менее важно увеличение доли бобовых культур; введение пожнивных посевов; рациональное соотношение полевых и кормовых севооборотов, культурных пастбищ и сенокосов; максимально возможное содержание поверхности почвы под покровом растений или растительных остатков [24, 29].

В севооборотах со смешанными культурами увеличивается разнообразие жизненных форм растений и биоты, повышается потенциал воспроизводства экосистемы. Увеличение в севооборотах доли многолетних трав, по аналогии с природными экосистемами, обеспечивает реутилизацию питательных элементов, способствует предотвращению эрозии, стабилизирует содержание гумуса в почве, компенсирует его ежегодную потерю из экосистемы [30].

В системе контурно-ландшафтного земледелия многолетние травы в виде буферных полос шириной 30–40 м контурно размещаются на каждом поле севооборота через каждые 40–60 м в зависимости от крутизны, формы и экспозиции склона. Водорегулирующие лесные полосы, древесные и кустарниковые кулисы размещаются по центру буферной полосы, что значительно усиливает их почвозащитное и влагонакопительное значение. Сильно эродированные малопродуктивные участки залужаются полностью [25]. Наряду с люцерной, эспарцетом или донником, перспективно

выращивание козлятника восточного, посевы которого поддерживают оптимальную плотность стеблестоя за счёт корневых отпрысков и могут вегетировать в течение 10–15 лет без выпадения растений [31].

Перспективным приемом, направленным на воспроизводство плодородия почвы и улучшение фитосанитарной обстановки в степных агроландшафтах, является биологизация земледелия. Она предполагает замену чистого пара на сидеральный на бедных почвах и полях, отдалённых от животноводческих ферм [32–34]. Применение в качестве зелёного удобрения сидеральных культур, особенно бобовых (горох, вика, донник, люпины), даёт возможность обойтись без азотных удобрений, способствует эффективной очистке поля от вредителей, возбудителей болезней, улучшает агрохимические, микробиологические и физические свойства почвы [35, 36].

Одним из эффективных методов восстановления утраченных свойств почвы, основанных на способности многолетних трав формировать высокий урожай фитомассы, является фитомелиорация [37]. При её реализации менее ценные в кормовом отношении, но высокоэффективные по почвовосстанавливающей способности многолетние злаковые травы из естественных растительных сообществ, используются для восстановления сильно деградированных пахотных почв и пастбищ путём создания агростепей.

Применение адаптивных ресурсосберегающих технологий. История земледелия насчитывает несколько тысячелетий и тесно связана с отвальной обработкой почвы, характеризующейся деградацией незащищённых от эрозии почв и большой энергоёмкостью. Вопрос о нецелесообразности вспашки обсуждается в научных кругах уже со второй половины XIX века, когда была признана её эрозийная опасность и значимость в борьбе с засухой органической мульчи. На практике американский фермер Эдвард Фолкнер отказался от проведения зяблевой вспашки после разрушительных пыльных бурь 1934 г. Методы безотвальной обработки почвы в условиях Западной Сибири пропагандировал и успешно внедрил агроном-практик Т.С. Мальцев. Эти же идеи были закреплены в почвозащитной системе земледелия, разработанной А.И. Бараевым и другими агрономами-новаторами [38–40].

Убедительные результаты их экспериментов получили огромный резонанс, и идея «безпахотного земледелия» в начале XXI века получила широкое признание в мировой прак-

тике, хотя ещё и далека от практической реализации. Признаны перспективными ресурсосберегающие технологии нулевой (no-till) и минимальной обработки почвы, направленные на защиту её от эрозии, сохранение и повышение плодородия, а также сокращение издержек производства [41–50]. Такие технологии широко используются в Аргентине, Бразилии, Канаде, США, Австралии, Европейских странах на площади более 120 млн га [51–54].

Технология прямого посева (no-till), базирующаяся на посеве по стерне предыдущей культуры без предварительного рыхления, способствует приобретению почвой зернистой структуры, хорошей водопроницаемости и влагоёмкости, высокой активности биологических процессов [55, 56].

При отсутствии механической обработки оптимальная плотность почвы поддерживается снабжением техники сдвоенными колёсами с низким давлением шин и выращиванием в севооборотах разуплотняющих культур с глубоко проникающей разветвлённой стержневой корневой системой – рапса, рыжика, сафлора, нута. Равномерно распределённая по поверхности поля солома формирует органическое покрытие, существенно снижающее испарение, предотвращает водную и ветровую эрозию. По природному подобию не происходит оборачивания верхнего плодородного слоя, вторжение в почву в виде неглубоких прорезей анкерными сошниками или дисками происходит только при посеве сельскохозяйственными машинами.

Для активизации разложения пожнивных остатков практикуется внесение минерального азота (10 кг/га), создающего благоприятные условия азотного питания для целлюлозоразлагающих микроорганизмов. Перспективно использование биопрепаратов Лигногумат, Экстрасол, Мизорин, Байкал ЭМ-1 и др., оказывающих стимулирующее влияние на микробиологические процессы трансформации соломы в микробную биомассу и гумусовые вещества [57].

Заслуживает особого внимания научный и производственный опыт подзимнего посева яровой пшеницы, имеющего несомненное тождество с природными условиями [58].

Адаптация подзимнего посева яровых зерновых культур к условиям степного земледелия при меняющихся антропогенных и погодных составляющих в агротехнологиях позволит в значительной степени стабилизировать их урожайность.

Заключение

Для обеспечения продовольственной безопасности населения и сохранения природного биоразнообразия в условиях природных и антропогенных изменений окружающей среды необходимы инновационные технологические подходы, направленные на формирование в адаптивном земледелии высокой сбалансированности и устойчивости агроландшафтов, восстановление и стабилизацию плодородия почвы, сокращение ресурсных затрат на производство сельскохозяйственной продукции и существенное повышение производительности труда.

Стратегия новационного природопользования позволяет в сельскохозяйственных экосистемах реализовывать степную агротехнику с максимальным воспроизведением основных черт природных экосистем и может рассматриваться как реальный путь восстановления экологического равновесия в ландшафтах.

Статья подготовлена по теме НИР Института степи УрО РАН: «Степи России: ландшафтно-экологические основы устойчивого развития, обоснование природоподобных технологий в условиях природных и антропогенных изменений окружающей среды», № ГР АААА-А17-117012610022-5.

References

1. Lohmann L. Land, power and forest colonization in Thailand // *Global Ecology and Biogeography Letters*. 1993. V. 3. No. 4/6. P. 180–191.
2. Huang J., Wang X., Zhi H., Huang Zh., Rozelle S. Subsidies and distortions in China's agriculture: evidence from producer-level data // *Australian Journal of Agricultural and Resource Economies*. 2011. V. 55 (1). P. 53–71.
3. Bradshaw C.J.A. Little left to lose: deforestation and forest degradation in Australia since European colonization // *Journal of Plant Ecology*. 2012. V. 5. No. 1. P. 109–120.
4. Shiva V. *Water wars: Privatization, pollution, and profit*. Berkeley, California: North Atlantic Books, 2016. 156 p.
5. Gulevich A.A., Baranova E.N., Shirokikh I.G., Shirokikh A.A. Genetic engineering approach in solving “unsolvable” issues of soil remittance // *Theoretical and Applied Ecology*. 2018. No. 2. P. 5–15 (in Russian). doi: 10.25750/1995-4301-2018-2-005-015
6. Kovalchuk M.V., Naraikin O.S. Nature-like technologies: new opportunities and new threats // *Security Index*. 2016. V. 22. No. 3–4 (118–119). P. 103–104 (in Russian).

7. Strategy of the scientific and technological development of the Russian Federation (approved by Decree of the President of the Russian Federation dated December 1, 2016 No. 642) [Internet resource] <http://www.kremlin.ru/acts/bank/41449> (Accessed: 14.01.2019) (in Russian).
8. Morozova G.S. A review of Holocene avulsions of the Tigris and Euphrates rivers and possible effects on the evolution of civilizations in lower Mesopotamia // *Geoarchaeology*. 2005. V. 20. No. 4. P. 401–423. doi: 10.1002/gea.20057
9. Coleman D.S., Callahan M.A., Crossley Jr.D.A. *Fundamentals of soil ecology*. London: Academic Press, 2017. 386 p.
10. Dokuchaev V.V. *Our steppe before and today*. Moskva: Selkhozgiz, 1953. 35 p. (in Russian).
11. Dotterweich M. The history of human-induced soil erosion: Geomorphic legacies, early descriptions and research, and the development of soil conservation – A global synopsis // *Geomorphology*. 2013. V. 201. P. 1–34.
12. Montgomery D.R. *Soil. Erosion of civilizations*. Ankara: FAO Sub-regional office for Central Asia, 2015. 409 p.
13. Berg G. Plant-microbe interactions promoting plant growth and health: perspectives for controlled use of microorganisms in agriculture // *Applied microbiology and biotechnology*. 2009. V. 84. No. 1. P. 11–18. doi: 10.1007/s00253-009-2092-7
14. Lal R., Mohtar R.H., Assi A.T., Ray R., Baybil H., Jahn M. Soil as a basic nexus tool: Soils at the center of the food-energy-water nexus // *Current Sustainable Renewable Energy Report*. 2017. V. 4 (3). P. 117–129. doi: 10.1007/s40518-017-0082-4
15. Kiryushin V.I., Belkov G.I. The scientific basis of adaptive landscape farming systems // *The system of sustainable agriculture of the Orenburg region*. Orenburg: Orenburgskoe knizhnoe izdatel'stvo, 1999. P. 10–11 (in Russian).
16. Chibilyov A.A., Levykin S.V., Kazachkov G.V. Steppe zone as a driver of sustainable development and economic growth // *Steppes of northern Eurasia*. Orenburg: Institut stepi Uralskogo otdeleniya Rossiyskoy akademii nauk, 2018. P. 100–103 (in Russian).
17. Davies J. The business case for soil // *Nature*. 2017. V. 543. No. 7645. P. 309–311.
18. Yakovlev A.S., Makarov O.A., Evdokimova M.V., Ogorodnikov S.S. Land degradation and sustainable development problems // *Pochvovedenie*. 2018. No. 9. P. 1167–1174 (in Russian). doi: 10.1134/S0032180X18090149
19. Chibilyov A.A. Key issues of regional environmental policy in the steppe zone of Russia and neighboring states // *Stepnoy byulleten*. 1998. No. 2. [Internet resource] <http://savesteppe.org/ru/archives/5435> (Accessed: 21.11.2018) (in Russian).
20. Levykin S.V., Kazachkov G.V., Yakovlev I.G., Grudin D.A. Arrangement of steppe agrolandscapes and their management as an axis of convergence of basic sciences and nature-like technologies // *Izvestiya Orenburgskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta*. 2017. No. 3 (65). P. 194–196 (in Russian).
21. The Codex Alimentarius Commission and the FAO/WHO Food Standards Programme. *Guidelines for the production, processing, marketing and labeling of organically produced foods*. Rome, Italy, 1999. 91 p.
22. The IFOAM Norms for organic production and processing. Version 2005. Germany, 2006. 136 p.
23. European Union Council Regulation No. 834/2007 of 28 June 2007 on organic production and labelling of organic products and repealing Regulation No. 2092/91 // *Official Journal of the European Union*. 2007. V. 189. 23 p.
24. Lopyrev M.I., Linkina A.V. Modernization of farming systems on an ecological-landscape basis // *Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta*. 2012. No. 3 (34). P. 49–56 (in Russian).
25. Biskayev N.K., Khoprenin V.D. Organization of contour-landscape agriculture // *The system of sustainable agriculture of the Orenburg region*. Orenburg: Orenburgskoe knizhnoe izdatel'stvo, 1999. P. 60–67 (in Russian).
26. Timofeev M.M. Landscape land utilization in biogenic agriculture // *Agrarnaya nauka*. 2003. No. 9. P. 15–16 (in Russian).
27. Filippova A.V., Karakulev V.V. Optimization of agrobiocenosis for stable grain production on the black soil of the southern Orenburg region // *Innovative processes in the agro-industrial complex*. Moskva: RUDN, 2014. P. 256–258 (in Russian).
28. Zhuchenko A.A. Biologization, greening, energy saving, economics of modern farming systems // *Vestnik APK Stavropolya*. 2015. No. 52. P. 9–13 (in Russian).
29. Dedov A.V. The main methods of improving the fertility of black soil // *Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta*. 2012. V. 1. P. 12–15 (in Russian).
30. Chibil'ov A.A. The steppe landscapes ecological optimization. Sverdlovsk: Izdatel'stvo UrOAN SSSR, 1992. P. 94–96 (in Russian).
31. Filatov V.I., Melnikov V.N., Luginina T.F., Slabzheninova N.V. The productivity of the Eastern Galega when using nitragin and physiologically active compounds in Nonblack Soil Zone // *Plodorodie*. 2010. No. 4 (55). P. 36–38 (in Russian).
32. Lobkov V.T. Biodiversity in agro ecosystems as a factor optimizing the biological activity of soil // *Eurasian Soil Science*. 1999. V. 32. No. 6. P. 664–668.
33. Glinushkin A., Beloshapkina O., Plygun S., Nikolaev N., Mishenina T., Myasnyankina G., Lukyantsev V., Dushkin S., Karamatova E., Vasilyeva A., Grigorieva N., Solovykh A., Rayov A. Effectiveness of winter wheat varieties of world selection in southural // *Russian Journal of Agricultural and Socio-Economic Sciences*. 2013. V. 16. No. 4. P. 11–18.
34. Glinushkin A.H., Plygun S.A., Ageev E.M., Ageev I.M., Devina N.I., Gromova L.S., Kosenko E.S. The

- possibility of legumes production // *Russian Journal of Agricultural and Socio-Economic Sciences*. 2013. V. 22. No. 10. P. 17–23.
35. Maksyutov N.A. Biological and resource-saving agriculture in the steppe zone of the Southern Urals. Orenburg: Dimur Publishing House, 2004. 204 p. (in Russian).
36. Organic farming enhances soil fertility and biodiversity: results from a 21 Year OI Field Trial Switzerland: Research Institute of Organic Farming (FiBL). Frick, 2000. Dossier No. 1. 96 p.
37. Gnevshva V.A. Phytomelioration // *Territoriya innovatsiy*. 2017. No. 1 (5). P. 17–22 (in Russian).
38. Faulkner E.H. *Plowman's Folly*. Moskva: Selkhozizdat, 1959. 276 p. (in Russian).
39. Maltsev T.S. The system of landless farming. Moskva: Agropromizdat, 1988. 128 p. (in Russian).
40. Ovsinsky I.E. New farming system. Novosibirsk: AGRO-SIBERIA, 2004. 86 p. (in Russian).
41. Aguiar T.R.Jr., Rasea K., Parron L., Brito A.G., Ferreira M.T. Nutrient removal effectiveness by riparian buffer zones in rural temperate watersheds: The impact of no-till crops practices // *Agricultural Water Management*. 2015. No. 149. P. 74–80. doi: 10.1016/j.agwat.2014.10.034
42. Altikat S., Celik A., Gozubuyuk Z. Effects of various no-till seeders and stubble conditions on sowing performance and seed emergence of common vetch // *Soil and Tillage Research*. 2013. No. 126. P. 72–77. doi: 10.1016/j.still.2012.07.013
43. Cavalieri K.M.V., Silva A.P., Tormena C.A., Leao T.R., Dexter A.R. Long-term effects of no-tillage on dynamic soil physical properties in a Rhodic Ferrasol in Paran, Brazil // *Soil and Tillage Research*. 2009. V. 103. No. 1. P. 158–164. doi: 10.1016/j.still.2008.10.014
44. Fernandez P.L., Blvarez C.R., Schindler V., Taboada M.A. Changes in topsoil bulk density after grazing crop residues under no-till farming // *Geoderma*. 2010. V. 159. No. 1–2. P. 24–30. doi: 10.1016/j.geoderma.2010.06.010
45. Islam R., Reeder R. No-till and conservation agriculture in the United States: An example from the David Brandt farm, Carroll, Ohio // *International Soil and Water Conservation Research*. 2014. V. 2. No. 1. P. 97–107. doi: 10.1016/S2095-6339(15)30017-4
46. Nascente A.S., Li Y.C., Crusciol C.A.C. Cover crops and no-till effects on physical fractions of soil organic matter // *Soil and Tillage Research*. 2013. No. 130. P. 52–57. doi: 10.1016/j.still.2013.02.008
47. Quiroga A., Fernández R., Noellemeyer E. Grazing effect on soil properties in conventional and no-till systems // *Soil and Tillage Research*. 2009. V. 105. No. 1. P. 164–170. doi: 10.1016/j.still.2009.07.003
48. Rouw A. de, Huon S., Souleleuth B., Jouguent P., Pierret A., Ribolzi O., Valentin C., Bourdon E. Possibilities of carbon and nitrogen sequestration under conventional tillage and no-till cover crop farming (Mekong valley, Laos) // *Agriculture, Ecosystems & Environment*. 2010. V. 136. No. 1–2. P. 148–161. doi: 10.1016/j.agee.2009.12.013
49. So H., Grabski A., Desborough P. The impact of 14 years of conventional and no-till cultivation on the physical properties and crop yields of a loam soil at Grafton NSW, Australia // *Soil and Tillage Research*. 2009. V. 104. No. 1. P. 180–184. doi: 10.1016/j.still.2008.10.017
50. Soane B., Ball B., Arvidsson J., Basch G., Moreno F., Roger-Estrade J. No-till in northern, western and south-western Europe: A review of problems and opportunities for crop production and the environment // *Soil and Tillage Research*. 2012. No. 118. P. 66–87. doi: 10.1016/j.still.2011.10.015
51. Manzatto C.V., Freitas Junior E., Perez J.R. *Uso Agrícola dos Solos Brasileiros*. Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 2002. 174 p.
52. Faostat – the statistical database of the Food and Agriculture Organization of the United Nations [Internet resource] <http://faostat.fao.org/default.aspx> (Accessed: 21.11.2018).
53. Monfreda C., Ramankutty N., Foley J.A. Farming the planet: 2. Geographic distribution of crop areas, yields, physiological types, and net primary production in the year 2000 // *Global Biogeochem. Cycles*. 22. GB1022. doi: 10.1029/2007GB002947
54. Derpsch R. The experience of South America: stages of the direct sowing technology implementation // *Resource-Saving Agriculture*. 2008. No. 1. P. 6–9 (in Russian).
55. Korchagin V.A., Shevchenko S.N., Gorjanin O.I., Novikov V.G. Direct sowing of grain crop in steppe districts of Middle Volga region. Samara: Izdatel'stvo Samarskogo nauchnogo centra RAN, 2008. 111 p. (in Russian).
56. Bakirov F.G., Polyakov D.G., Khalin A.V., Balandina A.A. Direct sowing and no-till in the Orenburg region // *Izvestiya Orenburgskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta*. 2018. No. 5 (73). P. 50–54 (in Russian).
57. Dolmatov A.P. The use of straw of grain crops as a fertilizer and methods of accelerating its decomposition in the soil // *Scientific support of innovative development of agriculture in conditions of frequently repeated droughts*. Orenburg: Agentstvo Pressa, 2017. P. 272–275 (in Russian).
58. Latyshev N. Early-winter sowing of spring wheat // *Agrarnyy sektor*. 2017. No. 3 (33). P. 114–116 (in Russian).

Carbon dioxide, heat and water vapor exchange in the boreal spruce and peatland ecosystems

© 2019. S. V. Zagirova¹ ORCID: 0000-0002-3304-4160^{*}

O. A. Mikhailov¹ ORCID: 0000-0002-6044-6528^{*}, Ju. Schneider² ORCID: 0000-0002-2790-8487^{*}

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

²Institute for Environmental Sciences, University of Koblenz-Landau,
7, Fortstrasse, Landau, Germany, 76829,
e-mail: zagirova@ib.komisc.ru

The mass and energy exchange between the terrestrial ecosystem and the atmosphere depends on the structure and functioning of vegetation and soil cover. The aim of the work was to compare the ecosystem CO₂, heat and water vapor exchange in the old-growth spruce forest and meso-oligotrophic peatland, typical ecosystems of the middle taiga landscapes on the European Russia. The study was made by using the eddy-covariance method. In the warm period of the year, the spruce forest ecosystem was characterized by higher values of the net radiation (R_n) and turbulent heat exchange (H) than the peatland. In the peatland, the latent heat flux (LE) in July represented more than the half of the net radiation. Net ecosystem exchange CO₂ (NEE) from 1st April to 31st August was -327 gC/m² in the spruce forest and -40 gC/m² in the peatland, and the total evapotranspiration (ET) was 324 mm and 300 mm, respectively. A close correlation was established between NEE and ET in daily dynamics ($R^2 = 0.7-0.9$). The average daily values of net exchange CO₂ in spruce forests are closely correlated with the net radiation ($R^2 = 0.63$) and turbulent heat exchange ($R^2 = 0.57$). For the meso-oligotrophic peatland, heat transfer factors turned out to be less significant ($R^2 = 0.38-0.45$). The obtained data can be used to predict carbon exchange processes and water vapor fluxes in terrestrial ecosystems due to expected climate changes in the region.

Keywords: spruce forest, peatland, carbon dioxide exchange, heat exchange, evapotranspiration.

УДК 630*187:582.475:556.56:55.584.4

Обмен диоксида углерода, тепла и влаги в экосистемах ельника и болота таёжной зоны

© 2019. С. В. Загирова¹, д. б. н., зав. отделом, с. н. с.,
О. А. Михайлов¹, к. б. н., н. с.,
Ju. Schneider², докторант,

¹Институт биологии Коми научного центра Уральского отделения РАН,
167982, Россия, Республика Коми, г. Сыктывкар, ул. Коммунистическая, д. 28,

² Институт экологических наук, Университет Кобленц-Ландау,
76829, Германия, г. Ландау, Форстрасе 7,
e-mail: zagirova@ib.komisc.ru

Обмен веществ и энергии между наземной экосистемой и атмосферой зависит от структурно-функциональной организации растительного и почвенного покровов. Цель работы состояла в сравнении экосистемного обмена CO₂, тепла и влаги в старовозрастном ельнике и на мезо-олиготрофном болоте, типичных экосистем для среднетаёжных ландшафтов европейской части России. Для измерения потоков вещества и энергии в приземном слое атмосферы использован метод микровихревых пульсаций. Согласно полученным данным, в тёплый период года ельник характеризовался более высоким радиационным балансом и турбулентным теплообменом с атмосферой, чем болото. В экосистеме болота более половины радиационного баланса в июле составили затраты на эвапотранспирацию. В тёплый период года ельник и болото выполняли функцию стока атмосферного диоксида углерода. Суммарный нетто-обмен CO₂ (NEE) в апреле–августе соответствовал -327 гC/m² в ельнике и -140 гC/m² на болоте, а суммарное испарение влаги (ET) – 324 и 300 мм. Для исследованных типов экосистем установлена тесная связь NEE и ET в суточной динамике ($R^2 = 0,7-0,9$). Среднесуточные значения нетто-обмена CO₂ в ельнике тесно коррелированы с радиационным балансом ($R^2 = 0,63$) и турбулентным теплообменом ($R^2 = 0,57$). Для мезо-олиготрофного болота

факторы теплообмена оказались менее значимыми ($R^2 = 0,38-0,45$). Полученные данные могут быть использованы при прогнозировании процессов углеродного обмена и потоков влаги в таёжных экосистемах в связи с ожидаемым изменением климатических условий в регионе.

Ключевые слова: ельник, болото, обмен диоксида углерода, теплообмен, эвапотранспирация.

Boreal forest and peatland ecosystems play a key role in the global carbon and water cycle. Boreal forests occupy an area of $1135 \cdot 10^6$ ha and accumulate annually $0.5 \cdot 10^{15}$ g of carbon. This is about 20% of all carbon stored in forests worldwide [1]. Peatland ecosystems area cover a much smaller area compared to forests, but they contain almost one-third of the global soil carbon [2]. Global temperature increase of the past decade has led to an enlargement in carbon stock in forests of the European Russia [1] and productivity of northern peatlands in recent decades due to climate change [3]. However, a further rise of temperature and the degradation of permafrost will turn large areas of forest and peatland in Subarctic to a carbon source by the end of this century [4, 5].

Forest and peatland ecosystems differ in the mass and energy exchange with the atmosphere. The amount of absorbed energy and its distribution to the turbulent heat and water vapor fluxes in the atmospheric boundary layer is largely dependent on the vegetation and wetting of the underlying surface [6, 7]. In turn, the carbon exchange of forest and peatland ecosystems is closely related to heat exchange [8–10].

In the European Northeast of Russia, dark coniferous forests predominate in the vegetation, the area of mires is about 8% [11]. According to climate predictions in this region, temperature and precipitation will be increasing up to the middle of this century [12], which may affect the energy and mass exchange of terrestrial ecosystems. However, to predict possible changes in the ecological functions of forest and peatland landscapes due to climate change, data from long-term stationary observations are needed. For the boreal ecosystems of Russia, such data are rare [13–15]. The purpose of this work was to compare the ecosystem CO_2 , heat and water vapor exchange in boreal old spruce forest and meso-oligotrophic peatland during the snow free period. We assumed that structure of vegetation (botanic composition, height and biomass of plants) and degree of soil moisture will influence on energy participation and carbon dioxide and water vapor exchange in spruce and peatland ecosystems.

Methods and study sites

The investigation of CO_2 and H_2O exchange between the peatland or spruce forest and atmosphere was carried out using the eddy covariance method (EC), which determines the exchange rate of the gas across the interface between the atmosphere and the plant canopy by measuring the covariance between fluctuations in vertical wind velocity and the mixing ratio of the gas being studied [16].

There are two EC systems established for measuring energy and mass exchange in the European North-East of Russia: one in spruce forest at the Lali forest station of the Institute of Biology of Komi Science Center ($62^\circ 16' \text{ N}$, $50^\circ 41' \text{ E}$) and the second at the mesooligotrophic peatland Medla-Pev-Nyur ($61^\circ 56' \text{ N}$, $50^\circ 13' \text{ E}$), situated in the northern direction from Syktyvkar. The distance between them is about 40 km. A bilberry-grass spruce, a bilberry sphagnum spruce and a mixed coniferous stand develop within the forest area. Their more detailed characteristics are presented in [17, 18]. Spruce stand is dominated by *Picea obovata* Ledeb., there are also *Pinus sylvestris* L., *Abies sibirica* Ledeb., *Betula pubescens* Ehrh., *Populus tremula* L. The height of spruce trees is 22 m, their age varies from 80 to 215 years. The measurement area of mesooligotrophic peatland is dominated by the following plant communities: oligotrophic pine-shrub-cotton grass-sphagnum type, mesotrophic shrub-grass-sphagnum type and mesotrophic grass-moss type. More information on the characteristics of peatland vegetation was presented in [14, 19].

The data of EC measurements from 1st of April to 31st of August 2013 are presented in this article. The system was installed in 3 m height in the peatland and included an ultrasonic anemometer (CSAT3D, Campbell Scientific Inc., USA) and an open-path CO_2 and H_2O gas analyser (Li-7500A, Li-Cor Inc., USA). An ultrasonic anemometer (Wind Master, Gill Instruments Ltd, USA) and an open-path CO_2 and H_2O gas analyser (EC-150, Campbell Scientific Inc., USA) was installed in 30 m height in the spruce forest.

The pulsations recorded by the instruments do not characterize the only point in which the

measuring instruments are located, but a certain area around this point, which is called a footprint and can be calculated using models. The size of this area is determined by the speed and direction of the wind, as well as the height of the instruments and the average height of the vegetation. Thus, the EC estimates the gases and heat fluxes, spatially averaged to the scale of the ecosystem. The analysis of the footprint showed that in the spruce forest 76% of the data points and 90% of the total volume of air flow, which was used by the system to calculate the flow of CO₂ (F_{CO_2}) and H₂O (ET), was formed at the distance of less than 200 m from the eddy tower, in 90% of all cases the maximum air flow came from a distance of less than 100 m. The wind directions during the summer were mainly S-W or S.

The raw data were logged at 20 Hz and calculated in the LoggerNet software (Campbell Scientific Inc., USA) and the EddyPro software (Li-Cor Inc., USA) in accordance with the generally accepted method of statistical processing of data [20]. At the next step data points of EC fluxes over 30 min intervals, which were obtained during unstable operation of gas analyser, low turbulence and unstable environment were removed.

At the next step the quality of the selected data was evaluated according to the ratio of Monin-Obukhov surface-layer scaling parameter (z/L) and footprint ($d_{jetch70}$) to friction velocity (u^*) at the moment of measurement. The critical value of u^* was 0.2 m/s for the spruce forest and 0.1 m/s for the peatland. Often, these were night-time measurements when the turbulence of the atmospheric boundary layer is low. At the final stage the data was checked visually, and poor data that had not previously been detected were removed from the dataset. In total, 5286 data points of 30-minute measurements for the forest and 7344 data points for the peatland were used in statistical analysis.

The calculated flux of carbon dioxide F_{CO_2} is equivalent to the net exchange of CO₂ (NEE), which represents the sum of two different processes: gross-photosynthesis (P_{gross}) and ecosystem respiration (R_{eco}) [21]:

$$NEE = P_{gross} + R_{eco} \quad (1)$$

In this study, the NEE will have a positive sign if R_{eco} exceeds P_{gross} and negative if P_{gross} exceeds R_{eco} . NEE with “-” sign indicates an uptake of CO₂ by the ecosystem from the atmosphere and with the “+” sign indicates upward fluxes e.g. emission from the ecosystems to the atmosphere.

Additional parameters (relative humidity and temperature of air and soil, radiation) were recorded at automatic weather stations on both sites.

The net radiation at the atmospheric boundary surface can be expressed by the equation [22]:

$$R_n = H + LE + G, \quad (2)$$

where R_n – net radiation, H – turbulent sensible heat flux, LE – turbulent latent heat flux, G – ground heat flux. During the investigation period this quality target was achieved in 84%.

It is assumed that R_n and G with the sign “+” correspond to the direction of heat fluxes from the atmosphere to the earth’s surface, and H and LE with the sign “-” – from the surface to the atmosphere.

Total evapotranspiration (ET) is calculated in accordance with the equation:

$$ET = LE / \lambda, \quad (3)$$

where λ is the heat of vaporization at 20 °C equal 2.45 MJ/kg.

The total flow of CO₂ and water vapor over a time was calculated as an integral with a 30-minute measurement step. The gaps were filled using average values calculated for a given time of a 15 days period.

Results and discussion

Weather conditions during the measurements. In 2013, the cold weather persisted until mid-March. The average daily temperatures above zero were recorded after 13th April. In the forest snow was gone by the beginning of May, and on the peatland by 20th April. The weather in April and May was warm, in June the average daily air temperature exceeded the long-term average (1965–2012 years) by 3.4 °C (Table 1).

Warm weather was observed in July and August, but a short-term drop in air temperature to 13 °C was measured at the end of July. The duration of the growing season (when the average daily air temperature exceeded 5 °C) was 146 days. The precipitation during the investigation period was about 160 mm, or 30% of the annual amount in 2013.

Heat fluxes at the atmospheric boundary surface. The structure of the vegetation effects the absorbing solar radiation and heat energy, and its transformation into turbulent fluxes.

Table 1

Average monthly air temperature and precipitation in 2013*

Month	Temperature, °C		Precipitation, mm/month	
	average	deviation**	in total	deviation**
April	2.2	1.0	15.3	-16.6
May	8.9	0.8	38.6	-2.1
June	17.4	3.4	34.9	-3.4
July	19.5	2.4	31.3	-41.2
August	16.2	2.5	40.2	-19.1

Note: * – according to Rosgidromet for Syktyvkar station (<http://rp5>); ** – deviation from the long-term average for the period 1961–1990.

Higher roughness of vegetation in forests decrease the wind speed and increase the turbulent heat exchange between the atmosphere and spruce stand [22]. As a result, the average daily air temperature over the forest in May–August was higher than over the peatland, the difference reached 5 °C on some days (Fig. 1).

At the same time, the temperature of the soil in spruce forest was lower than in the peatland, as a result of the shielding effect of tree crowns, which hamper the solar radiation to penetrate of under the canopy.

The albedo was lower in the forest (0.07–0.12), because the crown of spruce trees is characterized by a lower reflectivity than the other plants (Fig. 2). This is associated with a higher net radiation (R_n) of spruce forest (Fig. 3) and, con-

sequently, higher energy exchange, compared to a peatland ecosystem.

The change from negative to positive net radiation in the forest and on the peatland was registered at the end of March, when the snow cover still remained. During the growing season the maximum of the net radiation was in late June – early July, and R_n was twice higher in the forest compared to the peatland. There was a short-term decline in the net radiation in both ecosystems in late July, which could be due to a short-term decrease of temperature.

During the growing season spruce forest was characterized by higher values of turbulence heat exchange (H) than the peatland (Fig. 3). Daily values of H in the forest ecosystem reached 225 W/m², while at the peatland they did not

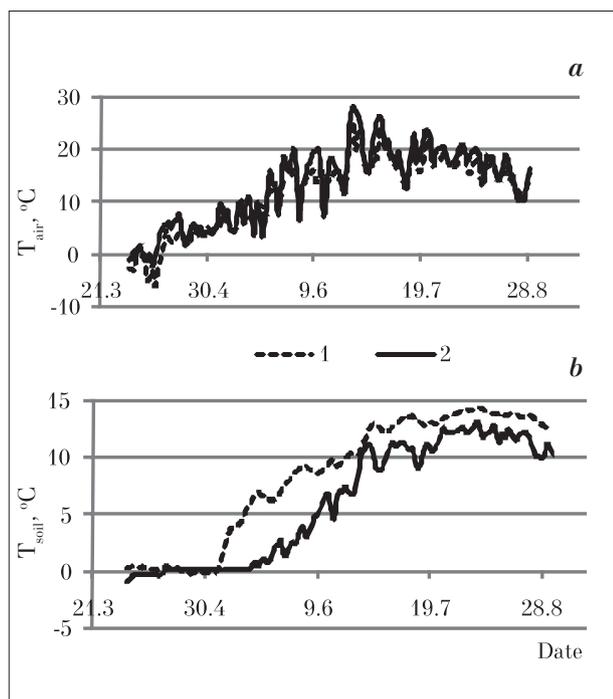


Fig. 1. Seasonal variation of average daily temperature at the atmospheric boundary surface (a) and the soil temperature at a depth of 20 cm (b): 1 – peatland, 2 – spruce forest

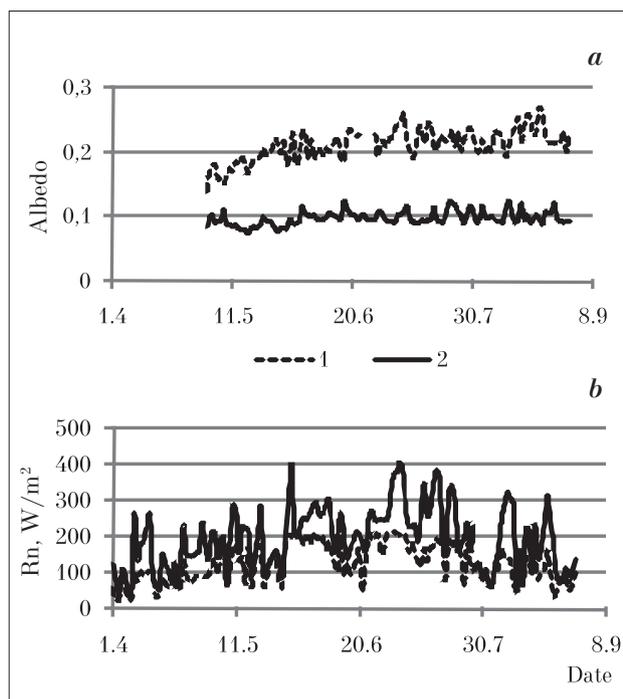


Fig. 2. Seasonal course of the average daily albedo (a) and the net radiation (b) at the boundary surface of atmosphere: 1 – peatland, 2 – spruce forest

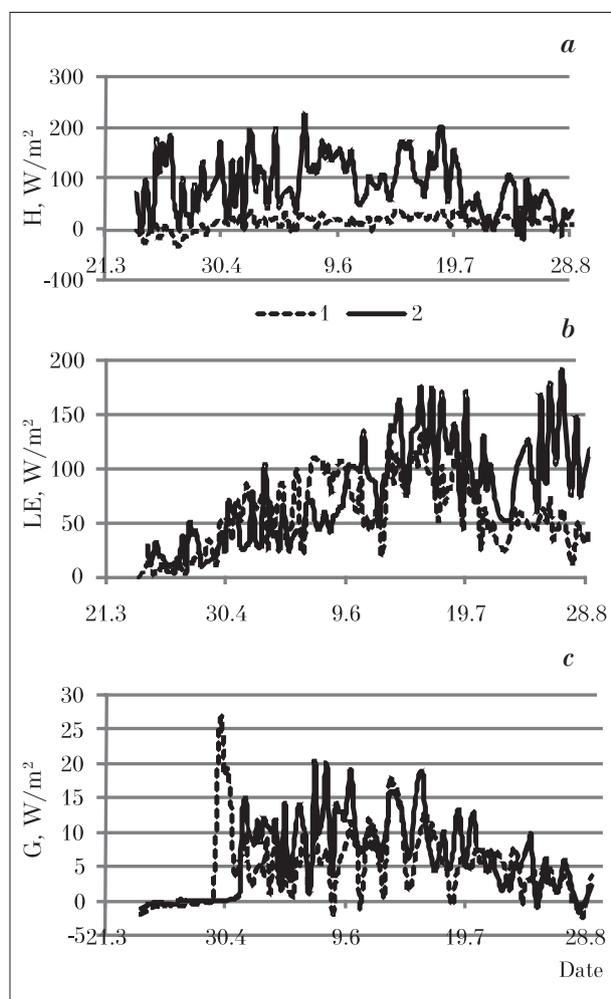


Fig. 3. Seasonal variation of the average daily turbulent heat flux (a), latent heat flux (b) and ground heat flux (c) in peatland (1) and spruce forest (2)

exceed 40 W/m^2 . Turbulent heat exchange in July was about 60% of the net radiation in the spruce forest, and 20% in the peatland. Thus, the latent heat flux exchange (LE) at the peatland risen to 70%. There was a short-term decline in LE and H due to a decrease in R_n . In the summer the heat exchange in the soil (G) of the forest and peatland was less than 10% of R_n . At the peatland site there we could observe some exceptions (in April) where it reached 25%.

Thus, the studied ecosystems show differences in the net radiation and its components. As the summer evaporation was not limited by the availability of soil moisture at the peatland ecosystem, LE exceeded H significantly, in contrast to the spruce forest (Fig. 4). At the peatland average daily values of the ratio H/LE (*Bowen* ratio) was 0.2–0.4 in July. In the spruce forest, *Bowen* ratio had its maximum in spring, during the summer it gradually decreased, reaching 0.4–0.5 in July. According to the available

results of EC measurements from other forest ecosystems, *Bowen* ratio can vary from 0.42 to 1.21 in summer, depending on the weather conditions [23]. For the northern peatlands of the European Russia in the summer, the ratio H/LE was 0.33–0.63 [28], and in Siberia – 0.3 [7].

Net ecosystem exchange CO_2 . Net ecosystem exchange CO_2 (NEE) is a result of two processes – photosynthesis and respiration. We measured differences in diurnal and seasonal course of NEE in the spruce forest and peatland ecosystems. In spring 2013 the conversion of the spruce forest from the source to the CO_2 sink was observed at the beginning of April, and at the peatland in May (Fig. 5). Autumn conversion of ecosystems from uptake to CO_2 emission was registered in late August. The rate the CO_2 fluxes increased in the first part of the season. The maximum NEE was measured in July in the spruce forest and at the peatland $-0.6 \text{ mgCO}_2/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ and $-0.1 \text{ mgCO}_2/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$, respectively. However, these ecosystems did not differ in duration of carbon dioxide uptake during the daytime. Cumulative average daily NEE in April–August varied in the spruce forest in the range -0.2 to $-16.6 \text{ gCO}_2/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$ (or -0.06 to $-5.0 \text{ gC}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$) (Table 2). Other studies reported different NEE values for the snow free season e.g. the average daily NEE value in the European southern taiga spruce forest was $-1.82 \text{ gC}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$ [15], in spruce forests of Siberia $-8 \text{ gC}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$ [25], and in North America – -5 to $-6 \text{ gC}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$ [26].

NEE at the peatland varied from 0.78 to $-1.94 \text{ gCO}_2/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$ at the beginning of the measurements and increased to $-9.29 \text{ gCO}_2/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$ at July – the time of most favorable temperature and light conditions for photosynthesis (Table 2). The mean diurnal CO_2 exchange decreased gradually in August. Thus, during the observation period the peatland ecosystem functioned as a sink of

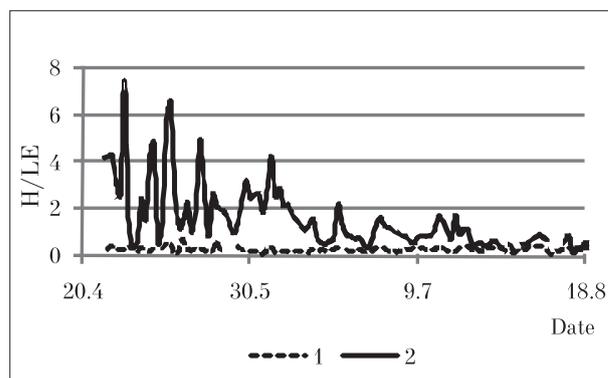


Fig. 4. The seasonal course of *Bowen* ratio at the boundary surface of atmosphere: 1 – peatland, 2 – spruce forest

Table 2

Cumulative value of *NEE* (gCO₂/(m² · d)) and evapotranspiration (mmH₂O/d) in peatland and spruce forest ecosystems in April–August 2013

Month	Peatland		Spruce forest	
	<i>NEE</i>	<i>ET</i>	<i>NEE</i>	<i>ET</i>
April	0.782	0.250	-0.198	0.376
May	1.239	2.156	-10.077	1.049
June	-1.941	3.093	-10.302	1.798
July	-9.294	0.237	-16.684	3.056
August	-2.289	1.684	-2.884	2.239

atmospheric carbon. Our continuous eddy covariance flux observations were also compared to data from studies of peatlands in Canada [27] and Russia [28].

Thus, the studied spruce forest and the meso-oligotrophic peatland differed in the rate of daily *NEE*, which affected the balance of *NEE* during the warm period of the year. The cumulative sum of *NEE* in April–August 2013 was -1.089 gCO₂/m² in the spruce forest or -327 gC/m², which is comparable with the data obtained in the research of boreal spruce forest in Siberia (-270 gC/m²; [25]) and in North America (-174 gC/m²; [26]), and green moss spruce forest in the southern taiga in European Russia (-300 gC/(m² · year); [15]). In general, the average value of *NEE* in forest at the age of 200 years and older can reach -240 g C/(m² · year) [29].

NEE of the peatland from 1st April to 31st August 2013 was -468 g of CO₂/m² (or -140 gC/m²),

which is comparable to the results obtained for Greenland boreal bogs (-310 – -372 gCO₂/m² [30]). The data was higher than observed at the mesotrophic swamp in the north of Finland (-186 – -217 gCO₂/m² [26]) and oligotrophic bogs of western Siberia (-132.44 – -133.32 gCO₂/m² [28]). *NEE* at peatlands of different regions can vary from 22 gC/(m² · year) to 144 gC/(m² · year) [31].

Evapotranspiration. The total evaporation or evapotranspiration (*ET*) of a terrestrial ecosystem is the result of two processes – physical evaporation of water from surfaces and transpiration of plants. In dark coniferous forests in the European North, transpiration reaches 80% of the total evaporation [27]. According to EC measurements evapotranspiration in ecosystems is mainly controlled by the stomatal conductance, which is strongly dependent on the moisture content of the atmosphere [32]. Evapotranspiration is characterized by interannual variability, e.g. in the coniferous forests of North America it varied between 230 mm and 305 mm [10] and was mostly independent on the amount of precipitation.

The spruce forest and the mesooligotrophic peatland differed in the availability of soil moisture. The volumetric water content of the upper soil in the spruce forest (0–20 cm) was 0.4 m³/m³ in April–May and gradually decreased at the end of July to 0.1 m³/m³. The water level at the peatland was 2 cm below the surface in May, dropped to -21 cm in July, its minimum of 27 cm was measured in late August.

In our study in May and June, the time of high ground water level, the average monthly value of evapotranspiration (*ET*) at the peatland was in 1.5–2 times higher compared to spruce forest (Fig. 5, Table 2). Water vapor fluxes markedly decreased in July, when the level of ground water did not exceed 20 cm, and in August, it was close to the values obtained for spruce. Maximum daily values of evapotranspiration (3 mm/d) in the peatland were observed in June, and in spruce forest in July. It was shown that the absolute

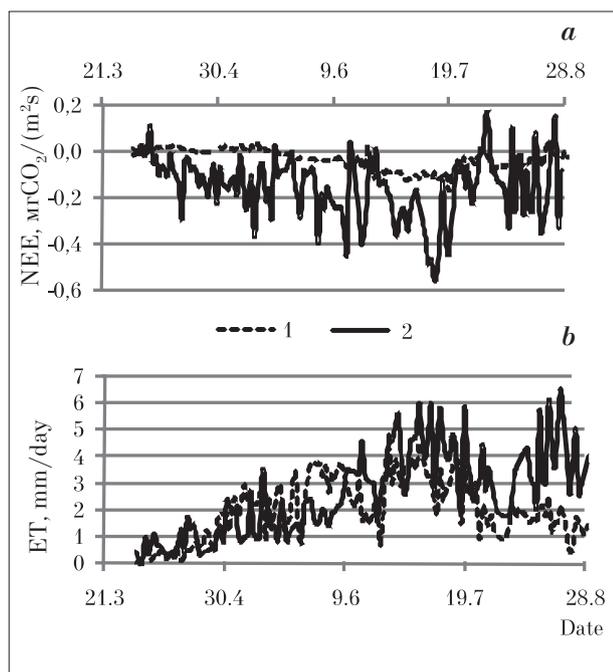


Fig. 5. The seasonal dynamic of the average daily net exchange CO₂ (a) and evapotranspiration (b) at the boundary surface of atmosphere. 1 – peatland, 2 – spruce forest

values of *ET* for different mire types can vary within the range of 2–15 mm/day. This variation is determined by local climate and wetland characteristics rather than by location [6].

The evapotranspiration of the investigation period differed slightly between the peatland and spruce forest and was 300 mm and 324 mm, respectively. Other studies showed the interannual variation of evapotranspiration, e. g. at the peatland of Canada it was 348–458 mm and in spruce forest – 238–325 mm [10], at pine forests in Finland 218–361 mm [26]. Chebakova et al. [7] reported 235 mm for an oligotrophic peatland in Siberia and Kurbatova et al. [24] 320 mm for the ombrotrophic peatland in European Russia. In the annual cycle, the total evaporation in boreal ecosystems is not a constant value and in some years it can significantly exceed the precipitation [33]. In a dry summer, evaporation is higher than in wet years.

The strong correlation between *NEE* and *ET* was observed in the spruce forest and peatland ecosystems ($R^2 = 0.7–0.9$). This confirms existing hypotheses about stomatal regulation of photosynthesis and water vapor exchange between the atmosphere and the ecosystem [9, 10]. This explains also that the water use efficiency in terrestrial ecosystems is relatively constant in different years [10]. The average daily values of net CO_2 exchange in spruce forests are closely correlated with the net radiation ($R^2 = 0.63$) and turbulent heat exchange ($R^2 = 0.57$). For the meso-oligotrophic peatland, heat transfer factors turned out to be less significant ($R^2 = 0.38–0.45$). The leaf area index and *pH* of the water are more appropriate predictors of carbon exchange of northern peatlands [31]. Obviously, the strength of correlation between *NEE* and climatic factors during the snow free period is determined by the weather conditions, so it can vary from year to year.

Conclusion

Our EC measurements showed that ecosystem CO_2 , heat and water vapor exchange differ in the boreal spruce forest and in the mesooligotrophic peatland. In the peatland ecosystem, which is characterized by excessive moisture and no water resource limitation, 70% of the net radiation was spent on evapotranspiration. Evapotranspiration in the spruce forest was much lower, and turbulent heat exchange reached 60% of the net radiation. The studied spruce forest and mesooligotrophic peatland functioned as carbon sink during the vegetation

period. Net ecosystem exchange of CO_2 from 1st April to 31st August was -327 gC/m^2 in the spruce forest and -40 gC/m^2 in the peatland, and the total evapotranspiration was 324 mm and 300 mm, respectively. A close correlation was established between *NEE* and *ET* in daily dynamics ($R^2 = 0.7–0.9$). The average daily values of net exchange CO_2 in spruce forests are closely correlated with the net radiation ($R^2 = 0.63$) and turbulent heat exchange ($R^2 = 0.57$). For the meso-oligotrophic peatland, heat transfer factors turned out to be less significant ($R^2 = 0.38–0.45$). The obtained data can be used to predict carbon exchange processes and water vapor fluxes in terrestrial ecosystems due to expected climate changes in the region.

The studies were supported by the UNDP/GEF project “Strengthening Protected Area System of the Komi Republic to Conserve Virgin Forest Biodiversity in the Pechora Headwaters Region” No. 00059042, project of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences “Vertical fluxes of carbon-containing greenhouse gases in the boreal forest and peatland ecosystems at present climate” No. 18-4-4-17. The authors thank Mikhail Miglovets for assistance in the collection of field data, and Sergei Shvetsov and Sergey Kuzin for technical assistance.

References

1. Pan Y., Birdsey R., Fang J., Houghton R., Kauppi P., Kurz W., Phillips O., Shvidenko A., Lewis S., Canadell J., Ciais Ph., Jackson R., Pacala S., McCuire A.D., Piao Sh., Rautiainen A., Sitch S., Hayes D. A large and persistent carbon sink in the world’s forests // *Science*. 2011. V. 333. P. 998–993. doi: 10.1126/science.1201609
2. Gorham E. Northern peatlands: role in the carbon cycle and probable responses to climatic warming // *Ecol. Appl.* 1991. V. 1. P. 182–195.
3. Yu Z.C. Northern peatland carbon stocks and dynamics: a review // *Biogeosciences*. 2012. V. 9. P. 4071–4083. doi: 10.5194/bg-9-4071-2012
4. Tarnocai C., Canadell J.G., Schuur E.A.G., Kuhry P., Mazhitova G., Zimov S. Soil organic carbon pools in the northern circumpolar permafrost region // *Global Biogeochemical Cycles*. 2009. V. 23. P. gb2023. doi: 10.1029/2008GB003327
5. Gauthier S., Bernier P., Kuuluvainen T., Shvidenko A.Z., Schepaschenko D.G. Boreal forest health and global change // *Science*. 2015. V. 349. P. 819–822. doi: 10.1126/science.aaa9092
6. Lafleur P.M. Connecting atmosphere and wetland: energy and water vapour exchange // *Geography Compass*. 2008. V. 2 (4). P. 1027–1057. doi: 10.1111/j.1749-8198.2007.00132.x

7. Chebakova N.M., Vygodskaya N.N., Arnet A., Bellelli-Markezini L., Kolle O., Kurbatova Yu.A., Parfyonova E.I., Valentini R., Vaganov E.A., Shul'ce E.-D. Energy and mass exchange and productivity the main ecosystems in Siberia 1. Structure of heat balance during vegetation // *Izvestiya RAN. Seriya Biologicheskaya*. 2013. No. 6. P. 727–737 (in Russian). doi: 10.7868/S0002332914010044
8. Amiro B.D., Barr A.G., Black T.A., Iwashita H., Kljun N., McCaughey J.H., Morgenstern K., Murayama S., Nesic Z., Orchansky A.L., Saigusa N. Carbon, energy and water fluxes at mature and disturbed forest sites, Saskatchewan, Canada // *Agricultural and Forest Meteorology*. 2006. V. 136. P. 237–251. doi: 10.1016/j.agroformet.2004.11.012
9. McCaughey J.H., Pejam M.R., Arain M.A., Cameron D.A. Carbon dioxide and energy fluxes from a boreal mixedwood forest ecosystem in Ontario, Canada // *Agricultural and Forest Meteorology*. 2006. V. 140. P. 79–96. doi: 10.1016/j.agroformet.2006.08.010
10. Brummer Ch., T. Black A., Jassal R., Grant N., Spittlehouse D., Chen B., Nesic Z., Amiro B., Arain M.A., Barr A., Bourque Ch., Coursolle C., Dunn A., Flanagan L.B., Humphreys E., Lafleur P., Margolis H., McCaughey J.H., Wofsy S. How climate and vegetation type influence evapotranspiration and water use efficiency in Canadian forest, peatland and grassland ecosystems // *Agricultural and Forest Meteorology*. 2012. V. 153. P. 14–30. doi: 10.1016/j.agroformet.2011.04.008
11. Forests of Komi Republic. Syktyvkar: DiK, 1999. 332 p. (in Russian).
12. The second assessment report of Roshydromet on climate change and its consequences on the territory of the Russian Federation. Moskva: Roshydromet, 2014. 58 p. (in Russian).
13. Chebakova N.M., Vygodskaya N.N., Arnet A., Bellely-Markesini L., Kurbatova Yu.A., Parfenova E.I., Valentini R., Verkhovets S.V., Vaganov E.A., Schulze E.-D. Energy and mass transfer and productivity of the main ecosystems in Siberia (according to the results of measurements by the method of turbulent pulsations). 2. Carbon exchange and productivity // *Izvestiya RAN. Seriya biologicheskaya*. 2014. No. 1. P. 65–75 (in Russian). doi: 10.7868/S000233291306009
14. Schneider J., Kutzbach L., Wilmking M. Carbon dioxide exchange fluxes of a boreal peatland over a complete growing season, Komi Republic, NW Russia // *Biogeochemistry*. 2011. doi: 10.107/s10533-011-9684-x
15. Zamolodchikov D.G., Ginarsky M.L., Shilkin A.V., Marunich A.S., Karelin D.V., Blinov V.G., Ivaschenko A.I. Monitoring of cycles of carbon dioxide and water vapor at the “Log Taiga” polygon (Valdai National Park) // *Fundamentalnaya i prikladnaya klimatologiya*. 2017. V. 1. P. 54–68 (in Russian). doi: 10.21513/2410-8758-2017-1-54-68
16. Baldocchi D.D., Hincks B.B., Meyers T.P. Measuring biosphere-atmosphere exchanges of biologically related gases with micrometeorological methods // *Ecology*. 1988. V. 69. No. 5. P. 1331–1340 (in Russian).
17. Bioproduction in forest ecosystems of the North. Sankt-Peterburg: Nauka, 2011. 278 p. (in Russian).
18. Indigenous spruce forests of the North: biodiversity, structure, functions. Sankt-Petersburg: Nauka, 2006. 337 p. (in Russian).
19. Miglovets M.N., Zagirova S.V., Mikhailov O.A. Methane emission in plant communities of the middle taiga meso-oligotrophic bog // *Theoretical and Applied Ecology*. 2014. No. 1. P. 93–98 (in Russian). doi: 10.25750/1995-4301-2014-1-092-098
20. Vickers D., Mahrt L. Quality control and flux sampling problems for tower and aircraft data // *Journal of atmospheric and oceanic technology*. 1997. V. 14. P. 512–526.
21. Greco S., Baldocchi D.D. Seasonal variations of CO₂ and water vapor exchange rates over a temperate deciduous forest // *Global Change Biology*. 1996. V. 2. P. 183–197.
22. Pavlov A.V. Energy exchange in the landscape sphere of the Earth. Novosibirsk: Nauka, 1984. 254 p. (in Russian).
23. Launianen S. Seasonal and inter-annual variability of energy exchange above a boreal Scots pine forest // *Biogeosciences*. 2010. V. 7. P. 3921–3940. doi: 10.5194/bg-7-3921-2010
24. Kurbatova J., Atneht A., Vygotskaya N., Kolle O., Varlagin A., Milyukova I., Tchepakova N., Schulze E.-D., Lloid J. Comparative ecosystem-atmosphere exchange of energy and mass in a European Russian and a central Siberian bog 1. Intersesonal and interannual variability of energy and latent heat fluxes during the snowfree period // *Tellus B: Chemical and Physical Meteorology*. 2002. No. 54B. P. 497–513 (in Russian). doi: 10.3402/tellusb.v54i5.16683
25. Röser C., Montagnani L., Schulze E.-D., Mollicone D., Kolle O., Meroni M., Papale D., Marchesini L.B., Federici S., Valentini R. Net CO₂ exchange rates in three different succession stages of “dark taiga” of central Siberia // *Tellus*. 2002. No. 54B. P. 642–654.
26. Hollinger D.Y., Aber J., Dail E., Davidson E.A., Goltz S.M., Hughes H., Leclerc M.Y., Lee J.T., Richardson A.D., Rodrigues C., Scott N.A., Achuatavariar D., Walsh J. Spatial and temporal variability in forest-atmosphere CO₂ exchange // *Global Change Biology*. 2004. V. 10. P. 1689–1706. doi: 10.1111/j.1365-2486.2004.00847.x
27. Lafleur P.M., Roulet N.T., Bubier J.L., Froking S., Moore T.R. Interannual variability in the peatland-atmosphere carbon dioxide exchange at an ombrotrophic bog // *Global biogeochemical Cycles*. 2003. No. 17 (2). doi: 10.1029/2002GB001983
28. Arneht A., Kurbatova J., Kolle O., Shibistova O.B., Lloyd J., Vygodskaya N.N., Schulze E.-D. Comparative ecosystem-atmosphere exchange of energy and mass in a European Russian and a central Siberian peatland II. Interseasonal and interannual variability of CO₂ fluxes // *Tellus*. 2002. No. 54B. P. 514–530. doi: 10.1034/j.1600-0889.2002.01349.x

29. Luyssaert S., Schulze E.-D., Börner A., Knohl A., Hessenmöller D., Law B., Ciais P., Grace J. Old-growth forests as global carbon sinks // *Nature*. 2008. V. 455. P. 213–215. doi: 10.1038/nature07276

30. Nordstroem C., Soegaard H., Christensen T.R., Friborg T., Hansen B.U. Seasonal carbon dioxide balance and respiration of a high-arctic fen ecosystem in NE-Greenland // *Theoretical and Applied Climatology*. 2001. V. 70. P. 149–166.

31. Lund M., Bjerke J.W., Drake B.G., Engelsen O., Hansen G.H., Parmentier F.J.W., Powell T.L., Silvennoinen H., Sottocornola M., Tømmervik H., Weldon S., Rasse D.P. Low impact of dry conditions on the CO₂ exchange of a Northern-Norwegian blanket peatland // *Environ-*

ment Research Letters. 2015. No. 10. doi: 10.1088/1748-9326/10/2/025004

32. Kasurinen V., Alfredsen K., Kolari P., Mammarella I., Alekseychik P., Rinne J., Vesala T., Bernier P., Boike J., Langer M., Bellelli Marshesini L., Huisstened K.V., Dolman H., Sachs T., Ohta T., Varlagin A., Rocha A., Arain A., Oechel W., Lund M., Grelle A., Lindroth A., Black A., Aurela M., Laurila T., Lohila A., Berninger F. Latent heat exchange in the boreal and arctic biomes // *Global Change Biology*. 2014. V. 20. P. 3439–3456. doi: 10.1111/gcb12640

33. Barr A., Black T., Hogg E., Griffiths T., Morgenstern K., Kljun N., Theede A., Nesic Z. Climatic controls on the carbon water balances of a boreal aspen forests, 1994–2003 // *Global Change Biology*. 2007. V. 13. P. 561–576. doi: 10.1111/j.1365-2486.2006.01220.x

Мониторинг объектов природно-экологического каркаса застраиваемых территорий по материалам космических съёмок

© 2019. В. В. Беленко, к. т. н., доцент,
Московский государственный университет геодезии и картографии,
105064, Россия, г. Москва, Гороховский пер., д. 4,
e-mail: belenko.v.v@yandex.ru

Рассмотрены теоретические исследования автора, посвящённые мониторингу объектов природно-экологического каркаса (ПЭК) застраиваемых территорий по материалам космических съёмок. В статье кратко приведён аналитический обзор авторов по изучаемой проблеме. Приведена функциональная структура объектов ПЭК застраиваемых территорий. Теоретически обоснована методика автоматизированного выявления структуры ПЭК застраиваемых территорий с использованием космических изображений. Было выявлено, что применение индексных изображений для выявления объектов ПЭК позволяет с высокой степенью достоверности выявлять границы изучаемых объектов. В статье приведена методика по мониторингу изменений объектов ПЭК с применением алгоритма, написанного на языке программирования MATLAB. Применение автоматизированного алгоритма на указанном языке программирования позволяет на основе определения пороговых значений спектрально-яркостных характеристик объектов ПЭК выделять их контуры с достаточно высокой точностью. Выделение контуров производится для серии разновременных космических снимков. Используя модуль разности, строится результирующее разностное изображение, отражающее изменение объектов ПЭК. По результирующим изображениям составляется авторский оригинал карты изменений объектов ПЭК.

Ключевые слова: космические снимки, территориальное планирование, застраиваемые территории, природно-экологический каркас.

Monitoring of objects of the natural-ecological framework of the undeveloped territories based on satellite imagery

© 2019. V. V. Belenko ORCID: 0000-0002-7159-7428*
Moscow State University of Geodesy and Cartography,
4, Gorokhovskiy Pereulok, Moscow, Russia, 105064,
e-mail: belenko.v.v@yandex.ru

The author's theoretical studies devoted to the monitoring of objects of the natural-ecological framework of the not built-up areas on the basis of satellite imagery materials are considered. The article briefly presents an analytical review of the key work of domestic and foreign scientists on the studied problem. The functional structure of the objects of the natural-ecological framework of the not built-up territories is presented. The method of automated identification of the structure of not built-up areas using satellite imagery is theoretically justified. The basis for identifying the structure of objects of the natural-ecological framework is the formation of an index image based on the near-IR, short-wave IR and red channels. This allows to concentrate in one image the greatest amount of spectral-reflective information about the objects of the natural-ecological framework. The main element of such objects is vegetation, therefore the combination of the indicated spectral channels of a multispectral image allows to obtain more information about the object being studied, its structure and state.

The article presents a methodology for monitoring changes in the objects of the natural-ecological framework using an algorithm written in the programming language MATLAB. The method of monitoring the detection of changes in objects of the natural-ecological framework is based on the selection of their contours in a series of multi-temporal space images using an automated algorithm written in the MATLAB language. The choice of this approach is substantiated by the fact that most researchers use methods of controlled classification for such surveys, which do not give a high accuracy in isolating the contours of objects of the natural-ecological framework. The use of an automated algorithm in the specified programming language allows, based on the determination of the threshold values of the spectral-brightness characteristics of objects of the natural-ecological framework, to distinguish their contours with sufficiently high accuracy. The selection of contours is made for a series of multi-time satellite images, on the basis of which the resulting image is constructed using the spacing module. On the base of resulting images the author's original map of changes in objects of the natural-ecological framework is compiled.

Experimental studies conducted on a test area to test the developed methods showed their effectiveness, correctness and representativeness of the results obtained, which, ultimately, allows to monitor the state of the land of not built-up areas with a sufficiently high level of detail.

Keywords: satellite images, urban planning, mapping, ecological nets, not built-up area.

Природный потенциал застраиваемых территорий необходимо учитывать при территориальном планировании, так как устойчивость территории к антропогенному воздействию при ведении строительства снижается из-за уменьшения площади естественных экосистем. При возведении новых жилых районов и соответствующей инфраструктуры, необходимо соблюдать баланс между этими объектами и естественными экосистемами, иначе происходит разрушение природной среды, а это, в свою очередь, приводит к сокращению их экологических функций по поддержанию территории в устойчивом состоянии. В связи с этим важно выявить и проследить пространственно-структурную и динамику изменений объектов природно-экологического каркаса на застраиваемых территориях. Решению этой задачи поможет использование многозональных космических изображений, которые имеют необходимые для этого параметры съёмки. Поэтому задача изучения таких объектов по космическим снимкам и их картографирование является необходимой и актуальной для мониторинга земель застраиваемых территорий.

Краткий аналитический обзор ключевых работ

Вопросами изучения структуры и динамики изменений естественных экосистем и их оценкой занимались многие учёные, как зарубежные, так и отечественные. Так, работа [1] посвящена аэрокосмическому мониторингу нарушенности открытых земель; работа [2] аэрокосмическому топографическому мониторингу нарушений городских земель. Интересна работа [3], посвящённая выделению границ экосистем посредством мультифрактальной сегментации спутниковых изображений высокого разрешения. В ней авторы демонстрируют новый подход на основе мультифрактальной сегментации космических снимков, который позволяет повысить точность обнаружения границ лесов с различным типом растительности. В работе [4] уделено внимание оценке состояния городских территорий по материалам дистанционного зондирования с целью выявления зон поражения нефтепродуктами

окружающей среды. По материалам космической съёмки проведена всесторонняя оценка состояния территорий г. Грозный и выделены зоны поражения нефтепродуктами окружающей среды, что позволило дополнить данные о признаках дешифрирования различных объектов нефтяного промысла. Интересна работа [5], посвящённая тематической обработке космических снимков с целью повышения точности визуального дешифрирования на основе применения вегетационных индексов. В ней авторы показали, что самую точную взаимосвязь с общей биомассой растительности имеет вегетационный индекс GEMI. Проблемы изучения структуры и динамики изменений нарушенности экосистем отражены в исследованиях [6–11].

Вопросы изучения состояния лесных ресурсов рассмотрены в [12], оценка динамики зелёных насаждений городской территории по космическим снимкам – в [13], вопросы изучения почвенно-растительного покрова городских экосистем по космическим снимкам высокого разрешения и снимков с беспилотных летательных аппаратов – в [14], вопросы исследования городских экосистем – в [15], вопросы дистанционного зондирования растительности оптико-микроволновыми методами – в работах [16–19].

По результатам аналитического обзора научных исследований отечественных и зарубежных авторов, а также нормативных документов для решения обозначенных проблем необходимо решить следующие научные задачи: разработать методику автоматизированного выявления структуры объектов природно-экологического каркаса (ПЭК) с использованием космических изображений; разработать методику мониторинга объектов ПЭК с применением алгоритма выявления изменений их структуры по материалам космической съёмки.

Методика и результаты исследования

В структуре ПЭК предлагается выделять следующие основные элементы: базовые элементы (крупные лесные и болотные природно-территориальные комплексы, не имеющие охранного статуса); ключевые элементы (коренные лесные и болотные природно-



Рис. 1. Методика выявления структуры природно-экологического каркаса
Fig. 1. Method of identifying the structure of the natural-ecological framework

территориальные комплексы, водоразделы малых рек и ручьёв); связующие элементы (долинные природно-территориальные комплексы крупных и малых рек; русла рек). Кроме этого выделяют второстепенные элементы: защитные; восстановленные. Указанный функциональный состав объектов ПЭК разработан на основе исследований, приведённых в работе [20]. Для выявления структуры ПЭК застраиваемых территорий разработана соответствующая методика (рис. 1).

В качестве тестовой для исследований территории выбран Ленинский муниципальный район Московской области, расположенный на юге Подмосковья. Район граничит на западе с Северным и Южным Бутово, на севере с МКАД, на востоке с рекой Москва, а на юге с Подольским районом и Домодедовским городским округом. Суть предлагаемой методики заключается в построении индексного изображения на основе суммирования ближнего ИК, коротковолнового ИК и красного каналов по формуле:

$$S = Rnir + Rmir + Rred,$$

где $Rmir$, $Rred$ и $Rnir$ значения спектральной яркости в ближнем ИК канале, красном и коротковолновом канале соответственно.

Выбор сочетания указанных спектральных зон снимка для построения индексного изображения обосновывается тем, что в этих каналах отражается наибольшее количество цифровой информации о растительности, основном объекте ПЭК. Для последующей контролируемой классификации были выделены следующие объекты: крупные лесные массивы (хвойные и широколиственные леса), долинные природно-территориальные комплексы малых рек, открытые лесные участки. Классификация основана на методе минимального расстояния.

На заключительном этапе происходит составление авторского оригинала карты ПЭК исследуемой территории. На рисунке 2 (см. цв. вкладку) представлен авторский оригинал карты ПЭК, отражающий его структуру.

Далее рассмотрим методику мониторинга автоматизированного обнаружения изменений объектов ПЭК на основе выделения контуров. На рисунке 3 представлена технологическая схема методики.

Мониторинг изменений объектов ПЭК предлагается изучать по 5–10-летним наборам временных космических снимков высокого и среднего разрешения. Это обусловлено тем, что указанный период наиболее предпочти-

телен для выявления изменений. Суть, представленной методики заключается в следующем. Для исходных изображений на начало и на конец изучаемого периода подбираются зональные изображения по наилучшим яркостным характеристикам и контрастности, которые лучше всего отображают объекты ПЭК. Далее выполняется определение пороговых значений спектрально-яркостных характеристик объектов ПЭК. Это необходимо для того, чтобы в дальнейшем, используя алгоритм, выделить границы объектов ПЭК. Специально для решения выделения границ на языке программирования MATLAB написан алгоритм. Идея алгоритма заключается в том, что в среде MATLAB открывается исходное изображение, далее вводятся значения яркости для конкретного объекта ПЭК, размер маски. На основе конкретного значения яркости с помощью маски сравниваются значения пикселей по всему изображению с заданным значением яркости объекта. Если конкретный пиксель попадает по заданное значение, то он попадает в границы выделяемого объекта; если же нет, то он не входит в данную область интереса. В результате обработки двух исходных космических изображений строится разностное изображение (рис. 4).

На данном изображении чёрным цветом отобразились произошедшие изменения объектов ПЭК исследуемой территории. На базе разностного изображения составлен авторский оригинал карты изменений объектов ПЭК (рис. 5, см. цв. вкладку). Для количественной оценки изменений объектов ПЭК предлагается использовать показатель тенденции изменения ($S_{тенд.}$) и скорость изменения объектов ПЭК ($V_{изм.}$). В таблице приведены динамические показатели разрушения естественных экосистем исследуемой территории для двух периодов наблюдений.

Основным фактором разрушения таких комплексов служит изменение травяного и древесного покрова под различные коммунально-бытовые нужды вследствие вырубки. Наибольшая скорость изменения наблюдается у природно-территориальных комплексов открытых пространств. Основным фактором их разрушения служит застройка индивидуальными жилыми домами. Изменений для крупных массивов широколиственных и хвойных лесов, а также для особо охраняемых природных территорий обнаружено не было. Крупные массивы широколиственных лесов оказались мало подвержены изменению, об этом говорят и динамические показатели



Рис. 3. Методика мониторинга обнаружения изменений объектов природно-экологического каркаса
 Fig. 3. Methods of monitoring the detection of changes in objects of the natural-ecological framework

В. В. БЕЛЕНКО
МОНИТОРИНГ ОБЪЕКТОВ ПРИРОДНО-ЭКОЛОГИЧЕСКОГО КАРКАСА ЗАСТРАИВАЕМЫХ ТЕРРИТОРИЙ
ПО МАТЕРИАЛАМ КОСМИЧЕСКИХ СЪЕМОК, С. 21

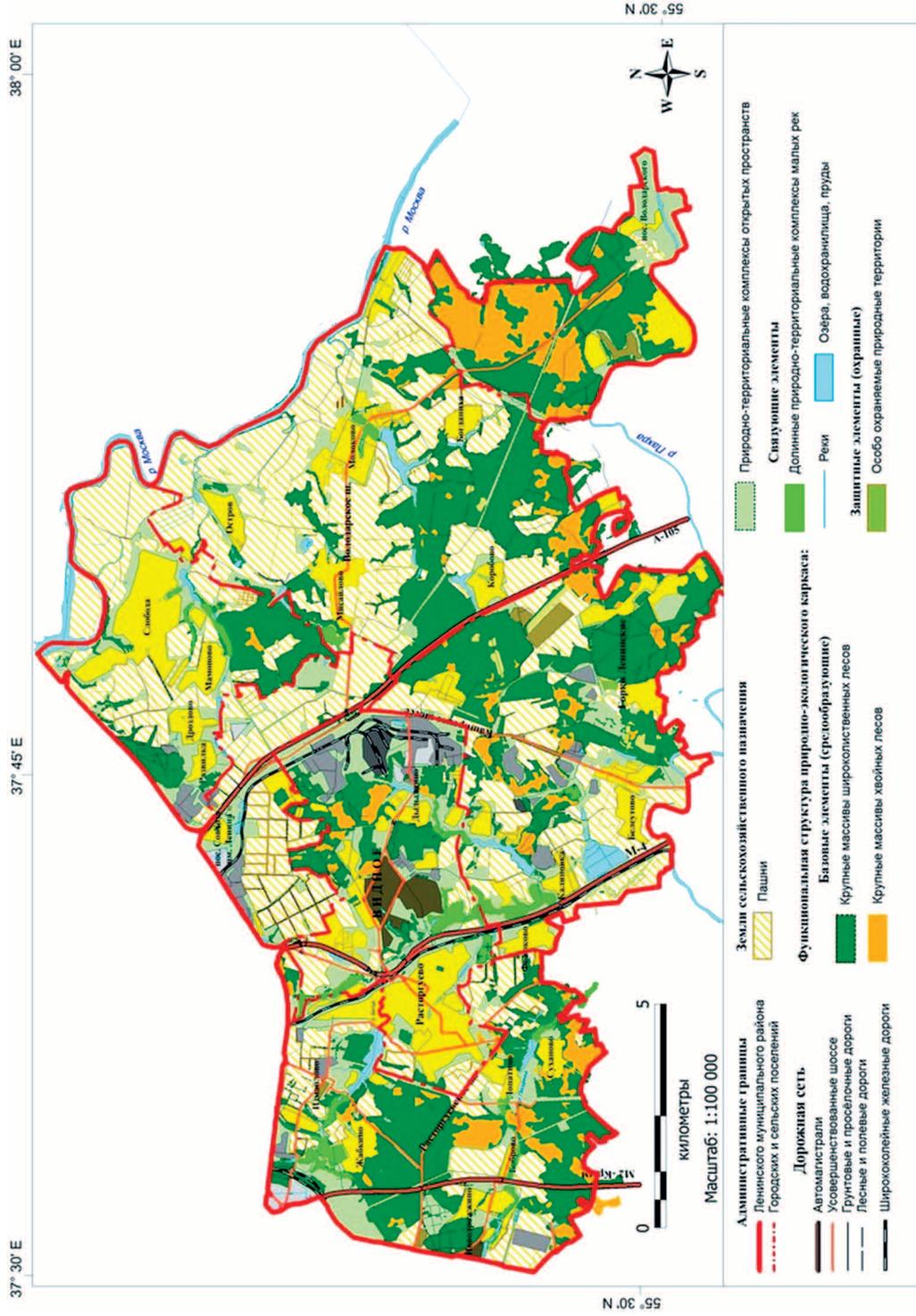


Рис. 2. Карта природно-экологического каркаса / **Fig. 2.** Map of the natural-ecological framework

В. В. БЕЛЕНКО
МОНИТОРИНГ ОБЪЕКТОВ ПРИРОДНО-ЭКОЛОГИЧЕСКОГО КАРКАСА ЗАСТРАИВАЕМЫХ ТЕРРИТОРИЙ
ПО МАТЕРИАЛАМ КОСМИЧЕСКИХ СЪЁМОК, С. 21

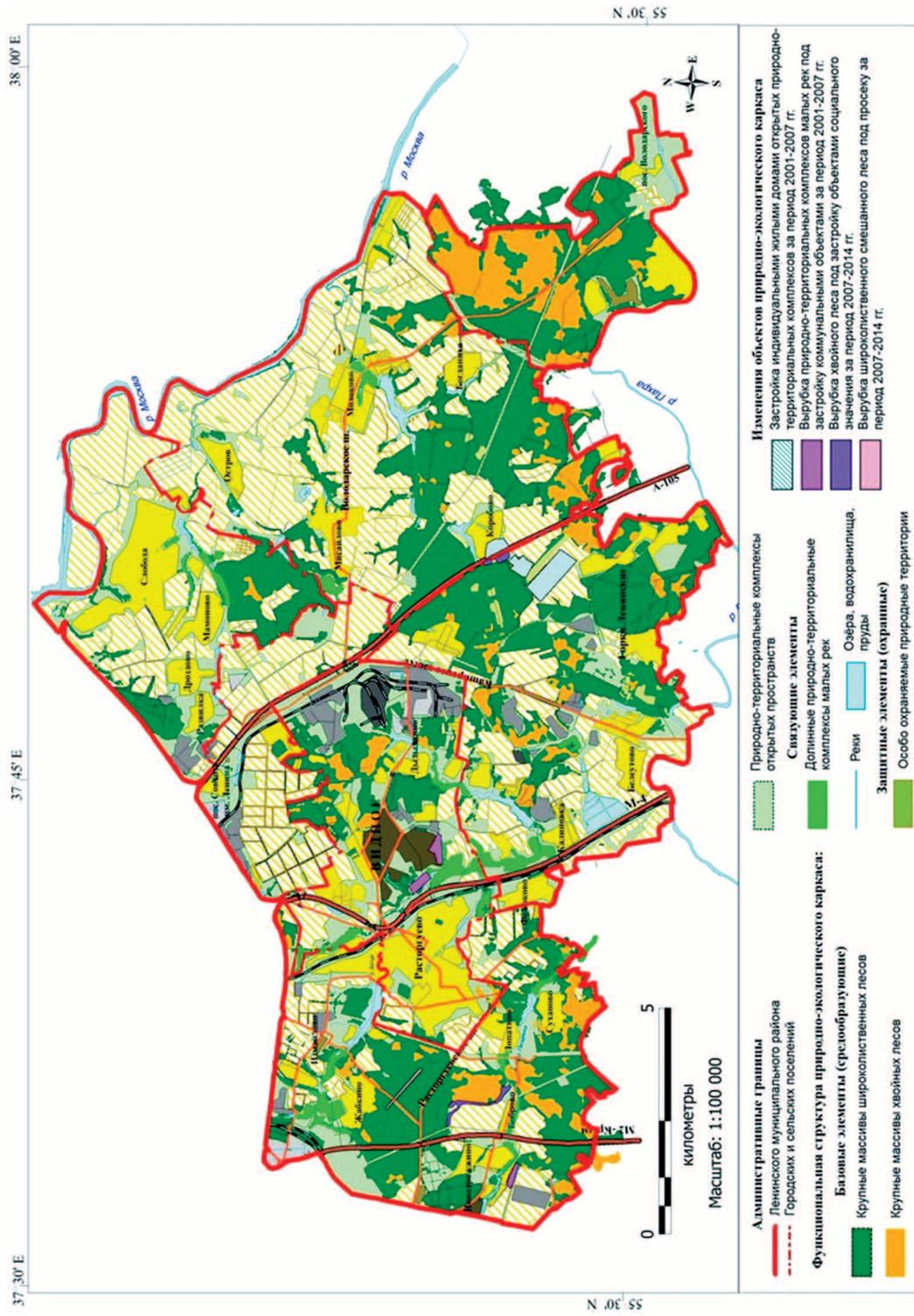


Рис. 5. Карта изменений природно-экологического каркаса / **Fig. 5.** Map of changes in the natural-ecological framework



Рис. 4. Разностное изображение, отображающее изменение объектов природно-экологического каркаса за период с 2007 по 2014 гг.
Fig. 4. Differential image showing the change in objects of the natural-ecological framework for the period from 2007 to 2014

Таблица / Table

Показатели изменения природно-экологического каркаса
 Indicators of changes in the natural-ecological framework

Наименование объекта природно-экологического каркаса The name of the object of natural-ecological framework	2001–2007 гг.		2007–2014 гг.	
	S _{тенд.} / trend indicator, %	V _{изм.} , га/год rate of change, ha/yr	S _{тенд.} / trend indicator, %	V _{изм.} , га/год rate of change, ha/yr
Крупные массивы широколиственных лесов / Large tracts of deciduous forests	0	0	0,1	0,97
Крупные массивы хвойных лесов / Large tracts of coniferous forests	0	0	2,3	6,22
Природно-территориальные комплексы открытых пространств / Natural-territorial complexes of open spaces	0,2	13,58	0	0
Долинные природно-территориальные комплексы малых рек / Valley natural-territorial complexes of small rivers	11	4,45	0	0
Особо охраняемые природные территории / Specially protected natural areas	0	0	0	0

разрушения естественных экосистем. Основным фактором разрушения массивов хвойных лесов служит застройка объектами социального значения.

Заключение

В основе выявления структуры ПЭК лежит формирование индексного изображения на базе ближнего ИК, коротковолнового ИК и красного канала. Методика мониторин-

га обнаружения изменений объектов ПЭК основана на выделении их контуров по серии разновременных космических изображений посредством автоматизированного алгоритма, написанного на языке MATLAB. Выбор такого подхода обосновывается тем, что большинство исследователей для подобных изысканий применяют методы контролируемой классификации, которые не дают высокой точности выделения контуров объектов. Применение автоматизированного алгоритма на языке

программирования позволяет на основе определения пороговых значений спектрально-яркостных характеристик выделять контура с достаточно высокой точностью. Проведённые экспериментальные исследования на тестовой территории по апробированию разработанных методик показали их действенность, корректность и репрезентативность полученных результатов.

Литература

1. Мельникова Е.Б. Аэрокосмический мониторинг нарушенных сельскохозяйственных земель // Известия ВУЗов. Геодезия и аэрофотосъёмка. 2010. № 2. С. 75–78.
2. Миртова И.А. Аэрокосмический топографический мониторинг нарушений городских земель (на примере Москвы) // Известия ВУЗов. Геодезия и аэрофотосъёмка. 2012. № 4. С. 58–65.
3. Учаев Д.В., Учаев Д.В., Чабан Л.Н. Разработка методики выделения границ лесных экосистем посредством мультифрактальной сегментации спутниковых изображений высокого разрешения // Известия ВУЗов. Геодезия и аэрофотосъёмка. 2012. № 4. С. 86–92.
4. Сладкопевцев С.А., Кубышкина К.Н. Оценка состояния территорий г. Грозный по материалам дистанционного зондирования земли в целях городского кадастра // Известия ВУЗов. Геодезия и аэрофотосъёмка. 2013. № 1. С. 64–70.
5. Каркон Варносфадерани М.М., Харазми Р.С., Шаповалов Д.А., Митрофанов Е.М. Оценка точности визуального дешифрирования растительного покрова на основе вегетационных индексов (на примере Загроса, Западный Иран) // Известия ВУЗов. Геодезия и аэрофотосъёмка. 2016. № 4. С. 90–93.
6. Majid F., Mohammad M. Dynamics and forecasting of population growth and urban expansion in Srinagar city – a geospatial approach // The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences. 2014. V. XL-8. P. 709–716.
7. Arshad A., Shahab F. Quantification of land transformation using remote sensing and GIS techniques // American Journal of Geographic Information System. 2012. V. 1. P. 17–28.
8. Seema R. Monitoring land use/land cover response to urban growth of the city of Jalandhar using remote sensing data // International Journal of Advanced Research. 2014. V. 2. P. 1122–1129.
9. Morenikeji E., Umaru S., Liman M., Ajagbe A. Application of remote sensing and geographic information system in monitoring the dynamics of land use in Minna, Nigeria // International Journal of Academic Research in Business and Social Sciences. 2015. V. 5. P. 320–337.
10. Rawat J.S., Kumar M. Monitoring land use/cover change using remote sensing and GIS techniques: A case

study of Hawalbagh block, district Almora, Uttarakhand, India // The Egyptian Journal of Remote Sensing and Space Science. 2015. V. 18. No.1. P. 77–84.

11. Xia Jing, Wan-Qiang Yao, Ji-Hua Wang, Xiao-Yu Song A study on the relationship between dynamic change of vegetation coverage and precipitation in Beijing's mountainous areas during the last 20 years // Mathematical and Computer Modelling. 2011. V. 54. No. 3–4. P. 1079–1085.
12. Zha Y., Gao J. Use of normalized difference built-up index in automatically mapping urban areas from TM imagery // International Journal of Remote Sensing. 2003. V. 24 (3). P. 583–594.
13. Миртова И.А., Телятников В.Н. Оценка динамики зелёных насаждений Москвы по космическим снимкам // Известия ВУЗов. Геодезия и аэрофотосъёмка. 2013. № 2. С. 75–81.
14. Зверев А.Т., Фисенко Е.В. Изучение почвенно-растительного покрова городских экосистем по материалам с беспилотного летательного аппарата и космическим снимкам высокого разрешения // Известия ВУЗов. Геодезия и аэрофотосъёмка. 2014. № 3. С. 52–56.
15. Erol H., Akdeniz F. A per-field classification method based on mixture distribution models and an application to Landsat Thematic Mapper data // International Journal of Remote Sensing. 2005. V. 26. P. 1229–1244.
16. Бондур В.Г., Чимитдоржиев Т.Н. Дистанционное зондирование растительности оптико-микроволновыми методами // Известия ВУЗов. Геодезия и аэрофотосъёмка. 2008. № 6. С. 64–74.
17. Guerschman J.P., Paruelo J.M., Bella C.D. Land cover classification in the Argentine Pampas using multi-temporal Landsat TM data // International Journal of Remote Sensing. 2003. V. 24. P. 3381–3402.
18. Friedl M.A., Melver D.K., Hodges J.C.F., Xiaoyang Z. Global land cover mapping from MODIS: Algorithms and early results // Remote Sensing of Environment. 2002. V. 83. P. 287–302.
19. Егоров В.А., Бартаев С.А., Колбудаев П.А., Плотников Д.Е. Карта растительного покрова России, полученная по данным спутниковой системы Proba-V // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2018. Т. 15. № 2. С. 282–286.
20. Природно-экологический каркас территории [Электронный ресурс] <http://terraplan.ru/архив/55-1-31-2011/938-630.html> (Дата обращения: 27.02.2018).

References

1. Melnikova E.B. Aerospace monitoring of disturbed agricultural land // Izvestiya VUZov. Geodeziya i aerofotosyemka. 2010. No. 2. P. 75–78 (in Russian).
2. Mirtova I.A. Aerospace topographic monitoring of violations of urban land (for example, Moscow) // Izvestiya VUZov. Geodeziya i aerofotosyemka. 2012. No. 4. P. 58–65 (in Russian).

3. Uchayev D.V., Uchayev D.V., Chaban L.N. Development of methods for identifying the boundaries of forest ecosystems through multifractal segmentation of high-resolution satellite images // *Izvestiya VUZov. Geodeziya i aerofotosyemka*. 2012. No. 4. P. 86–92 (in Russian).
4. Sladkoptev S.A., Kubyshkina K.N. Assessment of the state of the territories of Grozny based on materials of remote sensing of land for the purposes of the urban cadastre // *Izvestiya VUZov. Geodeziya i aerofotosyemka*. 2013. No. 1. P. 64–70 (in Russian).
5. Karkon Varnosfaderani M.M., Kharazmi R.S., Shapovalov D.A., Mitrofanov E.M. Assessment of the accuracy of visual interpretation of vegetation based on vegetation indices (using the example of Zagros, Western Iran) // *Izvestiya VUZov. Geodeziya i aerofotosyemka*. 2016. No. 4. P. 90–93 (in Russian).
6. Majid F., Mohammad M. Dynamics and forecasting of population growth and urban expansion in Srinagar city – a geospatial approach // *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*. 2014. V. XL-8. P. 709–716.
7. Arshad A., Shahab F. Quantification of land transformation using remote sensing and GIS techniques // *American Journal of Geographic Information System*. 2012. V. 1. P. 17–28. doi: 10.5923/j.ajgis.20120102.01
8. Seema R. Monitoring land use/land cover response to urban growth of the city of Jalandhar using remote sensing data // *International Journal of Advanced Research*. 2014. V. 2. P. 1122–1129.
9. Morenikeji E., Umaru S., Liman M., Ajagbe A. Application of remote sensing and geographic information system in monitoring the dynamics of land use in Minna, Nigeria // *International Journal of Academic Research in Business and Social Sciences*. 2015. V. 5. P. 320–337. doi: 10.6007/IJARBS/v5-i6/1682
10. Rawat J.S., Kumar M. Monitoring land use/cover change using remote sensing and GIS techniques: A case study of Hawalbagh block, district Almora, Uttarakhnad, India // *The Egyptian Journal of Remote Sensing and Space Science*. 2015. V. 18. No. 1. P. 77–84. doi: 10.5958/2455-7129.2017.00019.X
11. Xia Jing, Wan-Qiang Yao, Ji-Hua Wang, Xiao-Yu Song A study on the relationship between dynamic change of vegetation coverage and precipitation in Beijing’s mountainous areas during the last 20 years // *Mathematical and Computer Modelling*. 2011. V. 54. No. 3–4. P. 1079–1085. doi: 10.1016/j.mcm.2010.11.038
12. Zha Y., Gao J. Use of normalized difference built-up index in automatically mapping urban areas from TM imagery // *International Journal of Remote Sensing*. 2003. V. 24 (3). P. 583–594. doi: 10.1080/01431160304987
13. Mirtova I.A., Telyatnikov, V.N. Assessment of the dynamics of green space in Moscow by satellite images // *Izvestiya VUZov. Geodeziya i aerofotosyemka*. 2013. No. 2. P. 75–81 (in Russian).
14. Zverev A.T., Fisenko E.V. Study of the land cover of urban ecosystems based on materials from an unmanned aerial vehicle and high-resolution satellite images // *Izvestiya VUZov. Geodeziya i aerofotosyemka*. 2014. No. 3. P. 52–56 (in Russian).
15. Erol H., Akdeniz F. A per-field classification method based on mixture distribution models and an application to Landsat Thematic Mapper data // *International Journal of Remote Sensing*. 2005. V. 26. P. 1229–1244. doi: 10.1080/014311698216008
16. Bondur V.G., Chimitdorzhiev T.N. Urban ecosystem research on the basis of remote sensing data // *Izvestiya VUZov. Geodeziya i aerofotosyemka*. 2008. No. 6. P. 64–74 (in Russian).
17. Guerschman J.P., Paruelo J.M., Bella C.D., Giallorenz M.C., Pacin F. Land cover classification in the Argentine Pampas using multi-temporal Landsat TM data // *International Journal of Remote Sensing*. 2003. V. 24. P. 3381–3402.
18. Friedl M.A., Mervel D.K., Hodges J.C.F., Xiaoyang Z. Global land cover mapping from MODIS: Algorithms and early results // *Remote Sensing of Environment*. 2002. V. 83. P. 287–302. doi: 10.1016/S0034-4257(02)00078-0
19. Egorov V.A., Bartalev S.A., Kolbudayev P.A. Map of vegetation cover of Russia, obtained according to Proba-V satellite system data // *Sovremennyye problemy dstantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*. 2018. V. 15. No. 2. P. 282–286 (in Russian).
20. Natural and ecological framework of the territory [Internet resource] <http://terraplan.ru/arhiv/55-1-31-2011/938-630.html> (Accessed: 27.02.2018) (in Russian).

Использование космических снимков для определения границ водоёмов и изучения процессов эвтрофикации

© 2019. Т. И. Кутявина¹, к. б. н., с. н. с., В. В. Рутман¹, инженер,
Т. Я. Ашихмина^{1,2}, д. т. н., профессор, г. н. с., зав. лабораторией,
В. П. Савиных^{1,3}, д. т. н., профессор, член-корреспондент РАН,

¹Вятский государственный университет,

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

²Институт биологии Коми научного центра Уральского отделения РАН,
167982, Россия, Республика Коми, г. Сыктывкар, ул. Коммунистическая, д. 28,

³Московский государственный университет геодезии и картографии,
105064, Россия, г. Москва, Гороховский переулок, д. 4,

e-mail: kutyavinati@gmail.com

Проведено дешифрирование космических снимков со спутника Landsat 5. Определены индексы цвета, мутности, концентрации хлорофилла *a*, нормализованный вегетационный индекс (NDVI) и нормализованный разностный индекс воды (NDWI) для Белохолуницкого, Омутнинского, Большого Кирсинского и Чернохолуницкого водохранилищ Кировской области. Отмечено, что в условиях высокой мутности и цветности воды наиболее информативными для выявления береговой линии водных объектов являются индексы NDVI и NDWI. В весенний период значения индексов цвета воды, NDVI и NDWI ниже, чем в летний период. Показана возможность проведения оценки и сравнения степени развития фитопланктона, его пространственного распределения по акватории водохранилищ Кировской области с помощью индексов мутности и концентрации хлорофилла *a* в воде.

Ключевые слова: эвтрофирование, дистанционное зондирование Земли, Landsat 5, нормализованный вегетационный индекс, нормализованный разностный индекс воды, индекс цвета, индекс мутности, индекс концентрации хлорофилла *a*, «цветение» воды.

The use of satellite images to determine the boundaries of water bodies and study the processes of eutrophication

© 2019. T. I. Kutyavina¹ ORCID: 0000-0001-7957-0636, V. V. Rutman¹ ORCID: 0000-0002-9025-3487,
T. Ya. Ashikhmina^{1,2} ORCID: 0000-0003-4919-0047, V. P. Savinykh^{1,3} ORCID: 0000-0002-3259-6721,

¹Vyatka State University,

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

²Institute of Biology of the Komi Scientific Centre
of the Ural Branch of RAS,

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

³Moscow State University of Geodesy and Cartography,

4, Gorokhovskiy Pereulok, Moscow, Russia, 105064,

e-mail: kutyavinati@gmail.com

The purpose of the work is to select the most informative spectral indices for determining the boundaries of reservoirs and diagnosing the processes of eutrophication of water bodies in the Kirov region. Five satellite images obtained from the Landsat 5 satellite were decrypted. The water color index, turbidity index, chlorophyll concentration index *a*, normalized vegetation index (NDVI) and normalized index of water refractive index (NDWI) for four reservoirs in the Kirov region were determined: Belokholunitskoye, Omutninskoye, Bol'shoye Kirsinskoye and Chernokholunitskoye. To confirm and correct the data of deciphering the images, we used the results of bathymetric surveys, algological and chemical analyzes of water from the reservoirs of the Kirov region, obtained during ground-based field observations in water bodies. To build index maps, we used the QGIS software product, versions 2.18 and 3.8. Scales for indices were selected empirically, highlighting areas with similar indices. The minimum and maximum values of the index in the reservoirs were taken as the boundaries of the scale. It is noted that with high turbidity (more than 8 units of turbidity by formazine) and high water color (from 42 to 398 degrees of color), the most informative indicators for identifying the

boundaries of water bodies are the NDVI and NDWI indices. On satellite images taken in the spring, water color indices, NDVI and NDWI are lower than in the summer. In the Omutninsk reservoir, an increase in the turbidity index during the mass development of phytoplankton was noted. The ability to assess and compare the degree of development of phytoplankton, its spatial distribution over the water area of the Kirov region reservoirs using the turbidity indices and the concentration of chlorophyll *a* in water is shown. When analyzing index charts, it was noted that the maximum values of the chlorophyll concentration index *a* correspond to areas of the water area occupied by thickets of higher aquatic plants (Omutninskoe reservoir) and shallow areas with delayed water exchange (Omutninskoye, Belokholunitskoye reservoirs).

Keywords: eutrophication, remote sensing of the Earth, Landsat 5, normalized difference vegetation index, normalized difference water index, color index, turbidity index, chlorophyll concentration index *a*, algae "bloom".

В настоящее время антропогенная эвтрофикация рассматривается как один из важнейших факторов негативного воздействия человеческой деятельности на водные объекты. При эвтрофикации часто наблюдается «цветение» воды и массовое развитие высших водных растений. Это приводит к снижению рыбохозяйственного и рекреационного потенциалов водоёмов, оказывает негативное влияние на системы очистки воды из водных объектов для питьевого водоснабжения. Проблема интенсивного «цветения» воды, или массового развития водорослей и цианобактерий (ЦБ), актуальна для самых разных морских и пресноводных акваторий [1]. Показатели количественного обилия водорослей и ЦБ широко используются при определении трофического статуса водоёмов для принятия решений по их экологической реабилитации [2]. Однако получение этих данных является довольно трудоемким и затратным процессом, не позволяющим одновременно обрабатывать данные по удалённым друг от друга акваториям.

Современные спутниковые снимки и использование аэросъёмки позволяют дистанционно осуществлять мониторинг акваторий на качественно ином уровне, дополняя и частично заменяя непосредственные полевые исследования. Использование данных дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) обеспечивает полномасштабный и оперативный мониторинг состояния крупных водоёмов, а также распределение фитопланктона по всей акватории [3, 4]. Работы по использованию данных ДЗЗ для оценки «цветения» воды и трофического статуса водоёмов начали применяться за рубежом с конца 1990-х, в России – с 2000-х гг. Чаще исследования проводятся для морских акваторий, крупных водохранилищ, проведена работа на Ладожском и Псковско-Чудском озёрах, Ивановском водохранилище [5]. Разработан индекс «цветения» ЦБ СуаVI, апробированный на центральной и северо-восточной части Балтийского моря [6]. Однако работы по изучению «цветения» воды средствами ДЗЗ единичны, охватывают малое количество во-

доёмов. Существующие стандартные алгоритмы получения количественных характеристик «цветения» воды на основе данных ДЗЗ имеют ограничения применения, связанные с морфологическими, гидрохимическими и биологическими особенностями водных объектов. В связи с этим необходимо развивать региональные алгоритмы оценки данных ДЗЗ для внутренних пресноводных водоёмов, позволяющие получать достоверные результаты. При этом корректность интерпретации данных ДЗЗ должна подтверждаться результатами наземных наблюдений и исследований (гидрохимических, альгологических и др.).

Цель данной работы – подобрать наиболее информативные спектральные индексы для определения береговой линии водоёмов и диагностики процессов эвтрофирования водных объектов Кировской области.

Материалы и методы

В работе использовались космические снимки со спутника Landsat 5, даты съёмки 07.05.2011, 16.05.2011, 26.07.2011, 11.08.2011, 13.08.2011 (источник: U.S. Geological Survey). Для подтверждения и корректировки данных дешифрирования снимков использовали результаты батиметрической съёмки, альгологического и химического анализов воды из Белохолуницкого, Омутнинского, Большого Кирсинского и Чернохолуницкого водохранилищ Кировской области [7], полученных во время наземных полевых наблюдений на водоёмах 20.06.2011, 28.07.2011 и 05.10.2011.

В ходе работы были рассчитаны индекс цвета воды, нормализованный вегетационный индекс (NDVI) и нормализованный разностный индекс воды (NDWI), которые широко используются для обнаружения водных объектов по космическим многоспектральным изображениям [8–11], а также определены индексы мутности воды и концентрации хлорофилла *a*, которые имеют важное значение для выявления степени эвтрофирования водных объектов.

Расчёт NDVI проводили по формуле:

$$NDVI = \frac{(NIR - RED)}{(NIR + RED)},$$

где NIR – канал В4 ближнего инфракрасного спектра отражения с диапазоном 0,76–0,90 мкм, на космоснимках со спутника Landsat 5 этот канал выделяет береговую линию водоёма и отображает уровень развития биомассы растительности; RED – канал В3, представляет собой красный диапазон видимого спектра отражения солнечного излучения со значением 0,63–0,69 мкм, используется для оценки состояния и качества растительности.

Индекс NDVI обычно применяется для определения состояния наземной растительности, главным образом в сельскохозяйственной отрасли. Поскольку вегетационный индекс для исследования водохранилищ Кировской области применялся впервые, то возникла необходимость создания шкалы NDVI для водных объектов. Обычно показатель этого индекса для воды находится в диапазоне от -1 до 0. Однако нулевое значение индекса можно считать лишь условным, поскольку значения индекса для увлажнённых земель могут быть ниже нуля, а водоёмы, подверженные процессам эвтрофикации, окажутся со значениями выше нулевых. Надводная растительность может дать очень высокие показатели, близкие к единице.

Формула для расчёта NDWI имеет вид:

$$NDWI = \frac{(NIR - SWIR)}{(NIR + SWIR)},$$

где SWIR – дальний инфракрасный канал В5 с диапазоном длин волн 1,55–1,75 мкм. Канал В5 более чувствителен к влаге и позволяет чётко выделить береговую линию водоёма.

Первоначально индекс использовался только для мониторинга содержания воды в листьях растений. Затем NDWI начали применять для мониторинга водоёмов, обнаружения затоплений.

Индекс цвета рассчитывали как отношение:

$$\frac{GREEN}{BLUE},$$

где GREEN – зелёный канал видимого спектра излучения В2, с диапазоном спектра 0,52–0,60 мкм, позволяет обнаружить растительность; BLUE – синий диапазон спектра видимого электромагнитного излучения 0,45–0,52 мкм, канал В1. Этот канал выделяет глубину водоёмов, почву и отличает хвойные деревья от лиственных. Он крайне важен для

исследования состояния водных объектов, особенно таких показателей, как мутность, концентрация хлорофилла в воде, плотность и пространственное распределение планктонных водорослей [4].

Индекс мутности рассчитывали по формуле:

$$\frac{BLUE}{(BLUE + GREEN + RED)}.$$

Индекс мутности, или содержание взвеси в воде, был смоделирован при исследовании эталонных образцов на спектрофотометре. Индекс мутности позволяет сравнить показатели разных участков водоёмов и разные водоёмы в одно и то же время. Для получения точных показателей мутности на основе индекса требуется сопоставление с результатами полевых исследований.

Для расчёта индекса концентрации хлорофилла *a* использовали формулу:

$$\frac{(BLUE - RED)}{GREEN}.$$

Диапазон спектра отражения хлорофилла *a* установлен экспериментальным путём при исследовании водорослей пробах воды на спектрофотометре. Позже было предложено использовать снимки спутника Landsat 7 с аналогичным спектром электромагнитного излучения [5].

Так как создание шкал для растительно-водных индексов путём дробления на равные интервалы не всегда приводит к получению наглядной и достоверной карты, была проведена дополнительная работа со снимками. Путём просмотра значений показателя индекса были выделены области со сходными значениями. На основании этих показателей были выведены шкалы для индексов. Минимальное и максимальное значение индекса в водоёмах было принято как границы шкалы.

Для построения индексных карт использовали программный продукт QGIS версии 2.18 и 3.8.

Результаты и обсуждение

По значениям индексов цвета воды, NDVI и NDWI определены береговые линии Белохолуницкого, Омутнинского, Большого Кирсинского и Чернохолуницкого водохранилищ. Для сравнения были использованы границы водохранилищ, проведённые по данным визуального дешифрирования космических снимков. Анализ построенных индексных карт показал, что на исследуемой территории NDVI

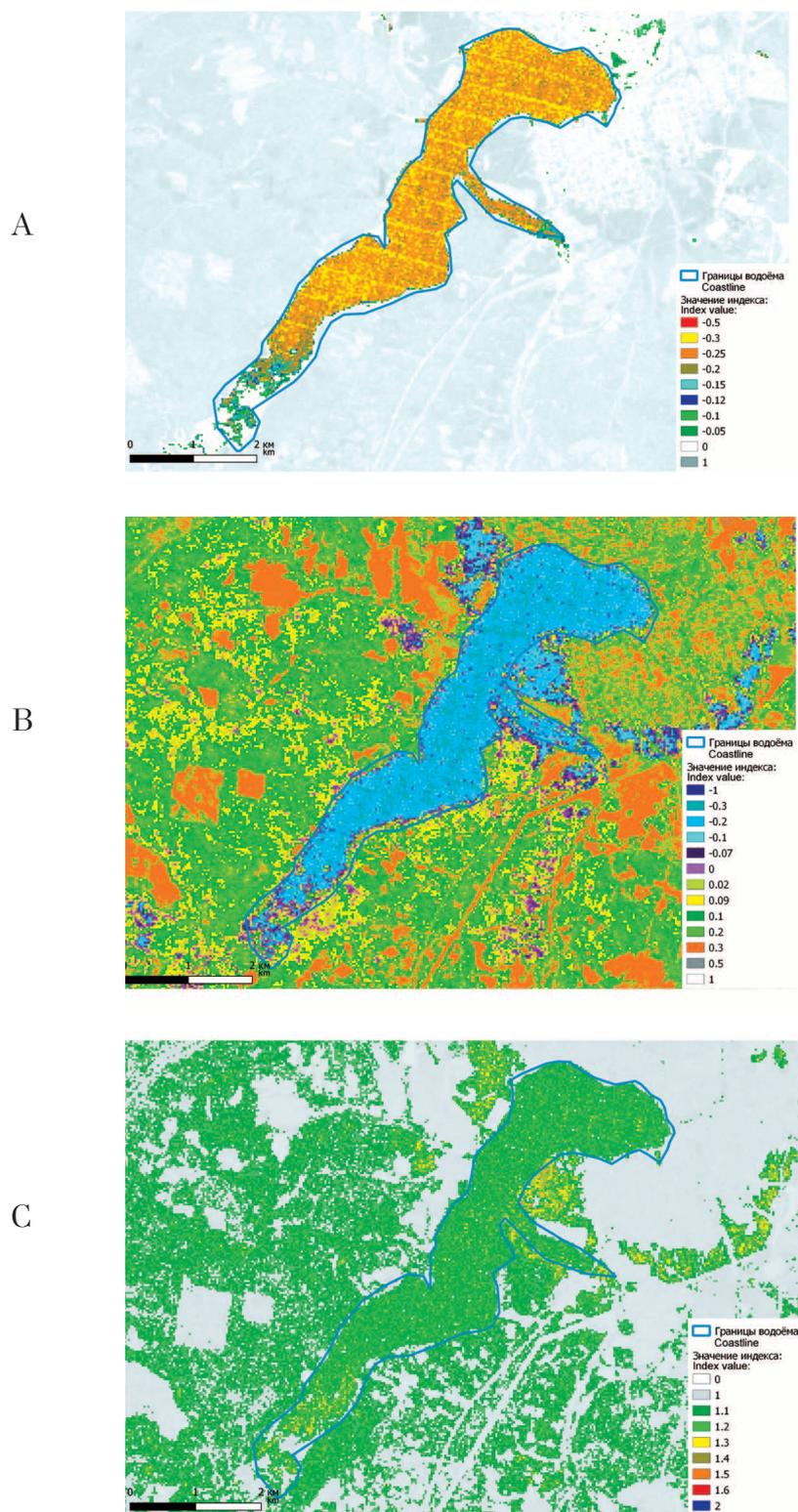


Рис. 1. Определение границ Омутнинского водохранилища по спектральным индексам (снимок от 16.05.2011): А – NDVI, В – NDWI, С – индекс цвета воды
Fig. 1. Determination of the boundaries of the Omutninsk reservoir by spectral indices (snapshot from May 16, 2011): А – NDVI, В – NDWI, С – water color index

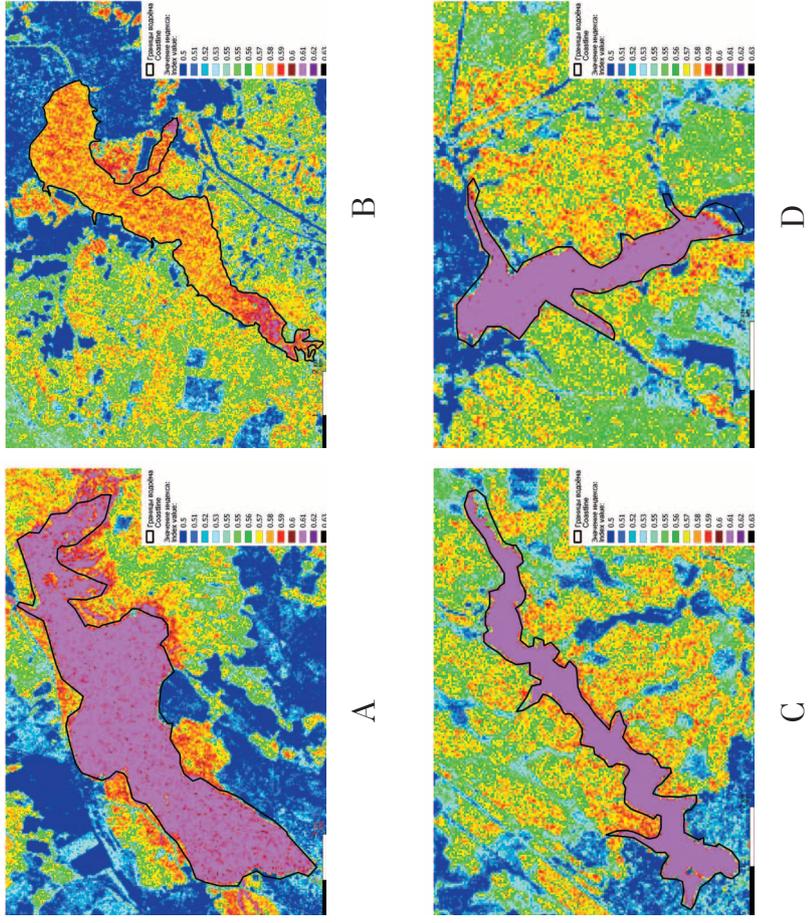


Рис. 2. Значения индекса мутности для водохранилищ Кировской области: А – Белохолуницкое, В – Омутнинское, С – Большое Киринское, D – Чернохолуницкое (снимок от 16.05.2011)
Fig. 2. Turbidity index values for reservoirs of the Kirov region: A – Belokholunitskoye, B – Omutninskoye, C – Bol'shoye Kirsinskoye, D – Chernokholunitskoye (snapshot from May 16, 2011)

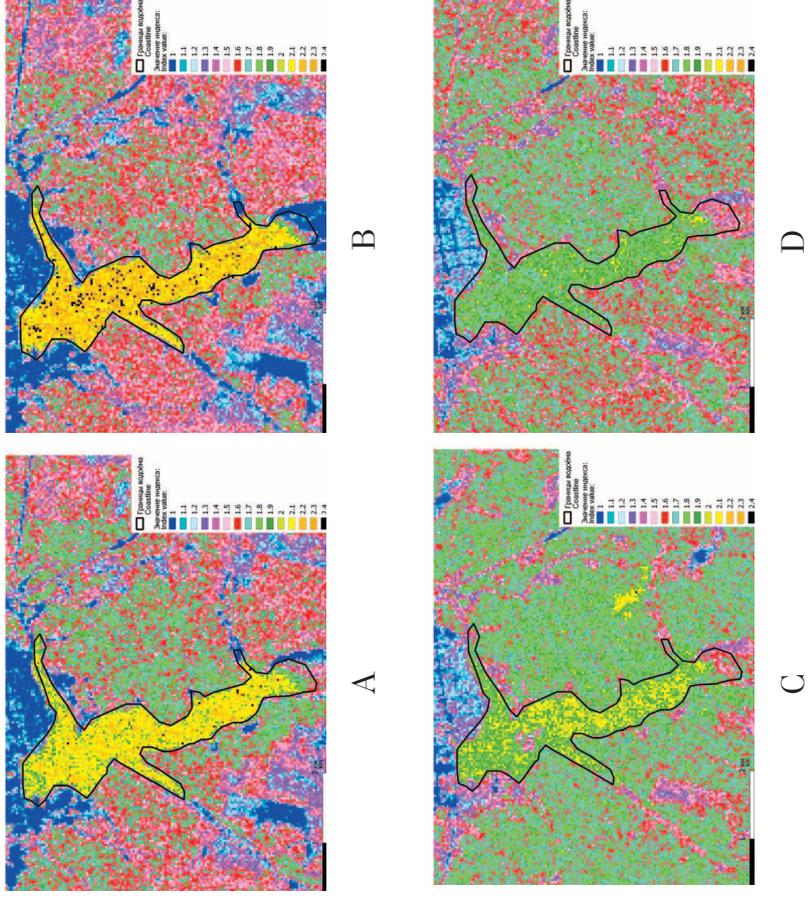


Рис. 3. Значения индекса хлорофилла a для Чернохолуницкого водохранилища Кировской области: А – 07.05.2011, В – 16.05.2011, С – 26.07.2011, D – 11.08.2011
Fig. 3. The values of the chlorophyll index a for the Chernokholunitsky reservoir of the Kirov region: A – 07.05.2011, B – 16.05.2011, C – 26.07.2011, D – 11.08.2011

и NDWI позволяют наиболее достоверно определить границы водохранилища по сравнению с индексом цвета воды (рис. 1, см. цв. вкладку). На значения индекса цвета воды, вероятно, повлияли высокие мутность и цветность воды, характерные для изучаемых водохранилищ. Значения цветности воды находились в диапазоне от 42 в Чернохолуницком водохранилище до 398 градусов цветности – в Большом Кирсинском. Величина мутности в большинстве исследуемых проб превышала 8 единиц мутности по формазину.

При сравнении значений спектральных индексов, рассчитанных для весенних и летних снимков по четырём водохранилищам Кировской области, обнаружено, что в летний период максимальные значения индексов и их диапазон больше, чем в весенний период (табл.). Такая разница в значениях может быть связана с влиянием мутности воды, а также с развитием высших водных растений и фитопланктона в летний период в поверхностном слое воды. В работе [8] отмечают, что чем выше величина мутности, тем ниже коэффициент отражения водной поверхности.

Мутность воды – один из основных показателей качества воды. Известно, что в периоды интенсивного развития фитопланктона, а также при образовании большого количества детрита в воде эвтрофных водоёмов в период вегетации мутность воды возрастает [12]. Расчёт индекса мутности позволяет регистрировать временные и пространственные изменения в водоёме по этому показателю. При построении индексных карт четырёх водохранилищ Кировской области было отмечено, что на снимках, сделанных 07.05.2011 и 16.05.2011 значения мутности для Белохолуницкого, Большого Кирсинского и Чернохо-

луницкого водохранилищ очень близки между собой. При этом на разных участках акватории каждого из водоёмов изменений в значении индексов не выявлено. В верховье Омутнинского водохранилища зафиксировано повышенное значение индекса мутности по сравнению с центральным и приплотинным участками водоёма, что согласуется с данными полевых исследований. При этом величина индекса мутности в этом водохранилище ниже, чем в других объектах исследования (рис. 2, см. цв. вкладку). Увеличение мутности в течение весенне-летнего сезона отмечено только в Омутнинском водохранилище, единственном из четырёх водоёмов, где в 2011 г. было зарегистрировано интенсивное «цветение» воды.

О степени эвтрофирования водного объекта можно судить по развитию фитопланктона и высших водных растений, которые можно определить, рассчитав индекс концентрации хлорофилла *a*. При построении индексных карт водохранилищ Кировской области по этому показателю было отмечено, что наибольшие изменения значений индекса в течение весенне-летнего сезона отмечены в Чернохолуницком водохранилище (рис. 3, см. цв. вкладку).

Максимальные значения индекса концентрации хлорофилла *a* во всех объектах исследования зафиксированы на снимке, сделанном 16.05.2011, минимальные – 13.08.2011. При анализе индексных карт отмечено, что максимальные значения соответствуют участкам акватории, занятым зарослями высших водных растений (Омутнинское водохранилище) и мелководным участкам с замедленным водообменом (Омутнинское, Белохолуницкое водохранилища). Для первого водоёма отмечено, что максимальные значения

Таблица / Table
Значения спектральных индексов крупнейших водохранилищ Кировской области в 2011 г.
The values of the spectral indices of the largest reservoirs in the Kirov region in 2011

Водоохранилище Reservoir	NDWI	NDVI	Индекс цвета Color index
Белохолуницкое Belokholunitskoye	<u>-0,1–0,22</u> -0,1–0,5	<u>-0,3–0</u> -0,15–0,5	<u>0,32–1,5</u> 0,34–2,7
Омутнинское Omutninskoye	<u>-0,1–0,48</u> -0,1–0,52	<u>-0,28–0</u> -0,2–0,5	<u>0,42–1,4</u> 0,35–3
Большое Кирсинское Bol'shoye Kirsinskoye	<u>-0,1–0,48</u> –	<u>-0,1–0,25</u> –	<u>0,9–1,6</u> –
Чернохолуницкое Chernokholunitskoye	<u>-0,1–0,37</u> -0,1–0,62	<u>-0,14–0,3</u> -0,2–0,6	<u>0,32–1,55</u> 0,34–3

Примечание: над чертой указаны минимальные и максимальные значения индексов в весенний период, под чертой – в летний. Прочерк означает отсутствие данных.

Note: the minimum and maximum indices in the spring are indicated above the line, and in the summer under the line. A dash indicates a lack of data.

индекса концентрации хлорофилла *a* совпадают с максимальными значениями индекса мутности воды. В работе [5] отмечалось, что высокие показатели концентрации хлорофилла *a* свидетельствуют об обильном развитии фитопланктона, что зачастую является главной причиной повышенной мутности и цветности водных масс. Таким образом, индекс мутности можно использовать как один из признаков для выявления участков массового развития фитопланктона и высших растений.

Заключение

Для анализа состояния водных объектов в настоящее время используется большое количество спектральных индексов. Однако, из-за различных физико-химических условий в водоёмах и отличий в степени их эвтрофирования, для каждого конкретного водного объекта необходимо эмпирическим путём подбирать наиболее информативные индексы и осуществлять корректировку используемых для их расчёта формул, подбирать шкалу измерений. Водоохранилища Кировской области отличаются высокой цветностью и мутностью воды. Для выявления границ этих водных объектов наиболее информативными оказались индексы NDVI и NDWI. Отмечено, что в весенний период значения индексов цвета воды, NDVI и NDWI **ниже, чем в летний период**, что может быть связано как с развитием высших водных растений и фитопланктона, так и с изменением физико-химической характеристики водных объектов. Индексы мутности и концентрации хлорофилла *a* позволяют проводить оценку и сравнение степени развития фитопланктона, его пространственного распределения по акватории водоохранилищ Кировской области.

Работа выполнена при поддержке гранта Президента Российской Федерации для государственной поддержки молодых учёных – кандидатов наук (МК-86.2019.5).

Авторы выражают благодарность Г. Я. Кантору, к.т.н., научному сотруднику Института биологии Коми НЦ УрО РАН за консультации по дешифрированию космических снимков.

Литература

1. Лаврова О.Ю., Соловьев Д.М., Строчков А.Я., Шендрик В.Д. Спутниковый мониторинг интенсивного цветения водорослей в Рыбинском водохранилище //

Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2014. Т. 11. № 3. С. 54–72.

2. Сластина Ю.Л., Ключкова М.А. Сезонная динамика фитопланктона оз. Четырехверстного // Водная среда и природно-территориальные комплексы: исследование, использование, охрана: Материалы IV шк.-конф. молодых учёных с междунар. участием. Петрозаводск, 2011. С. 121–123.

3. Balyuk T.V., Kutuzov A.V., Nazarenko O.G. Ecotone system of the southeastern coast of the Tsimlyansk Reservoir // Water Resources. 2007. V. 34. No. 1. P. 95–102.

4. Кутузов А.В. Оперативный спутниковый мониторинг скоплений планктонных водорослей и количественная оценка их плотности // Географический вестник. 2016. № 3 (38). С. 160–168.

5. Тихомиров О.А., Бочаров А.В., Комиссаров А.Б., Хижняк С.Д., Пахомов П.М. Использование данных сенсора Landsat 8 (OLI) для оценки показателей мутности, цветности и содержания хлорофилла в воде Ивановского водохранилища // Вестник ТвГУ. Серия «Химия». 2016. № 2. С. 230–244.

6. Anttila S., Fleming-Lehtinen V., Attila J., Junttila S., Alasalmi H., Hällfors H., Kervinen M., Koponen S. A novel earth observation based ecological indicator for cyanobacterial blooms // International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation. 2018. V. 64. P. 145–155.

7. Кутявина Т.И., Домнина Е.А., Ашихмина Т.Я., Савиных В.П. Морфометрические, гидрохимические и биологические особенности водохранилищ Северо-Востока Кировской области // Теоретическая и прикладная экология. 2013. № 2. С. 50–55.

8. Катаев М.Ю., Бекеров А.А. Методика обнаружения водных объектов по многоспектральным спутниковым измерениям // Доклады ТУСУРа. 2017. Т. 20. № 4. С. 105–108.

9. Ji L., Zhang L., Wylie B. Analysis of dynamic thresholds for the Normalized Difference Water Index // Photogrammetric Engineering & Remote Sensing. 2009. V. 75. No. 11. P. 1307–1317.

10. Sun F., Sun W., Chen J., Gong P. Comparison and improvement of methods for identifying waterbodies in remotely sensed imagery // International Journal of Remote Sensing. 2012. V. 33. No. 21. P. 6854–6875.

11. Адамович Т.А., Ашихмина Т.Я., Кантор Г.Я. Использование различных комбинаций спектральных каналов космических снимков спутника Landsat 8 для оценки природных сред и объектов (обзор) // Теоретическая и прикладная экология. 2017. № 2. С. 9–18.

12. Даценко Ю.С. Эвтрофирование водохранилищ. Гидролого-гидрохимические аспекты. М.: ГЕОС, 2007. 252 с.

References

1. Lavrova O.Yu., Solovov D.M., Strochkov A.Ya., Shendrik V.D. Satellite monitoring of color algae in the Rybinsk Reservoir // Sovremennye problemy distantsion-

nogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa. 2014. V. 11. No. 3. P. 54–72 (in Russian).

2. Slastina Yu.L., Klochkova M.A. Seasonal dynamics of phytoplankton of lake Chetyrekhverstnogo // Water environment and natural-territorial complexes: research, use, protection: Materialy IV shk.-konf. molodykh uchenykh s mezhdunar. uchastiem. Petrozavodsk, 2011. P. 121–123 (in Russian).

3. Balyuk T.V., Kutuzov A.V., Nazarenko O.G. Ecotone system of the southeastern coast of the Tsimlyansk Reservoir // Water Resources. 2007. V. 34. No. 1. P. 95–102. doi: 10.1134/S0097807807010101

4. Kutuzov A.V. Operational satellite monitoring of accumulations of planktonic algae and quantitative assessment of their density // Geograficheskiy vestnik. 2016. No. 3 (38). P. 160–168 (in Russian). doi:10.17072/2079-7877-2016-3-160-168

5. Tikhomirov O.A., Bocharov A.V., Komissarov A.B., Khizhnyak S.D., Pakhomov P.M. Using Landsat 8 (OLI) sensor data to measure turbidity, color, and chlorophyll content in the water of the Ivankovo reservoir // Vestnik TvGU. Seriya Khimiya. 2016. No. 2. P. 230–244 (in Russian).

6. Anttila S., Fleming-Lehtinen V., Attila J., Junttila S., Alasalmi H., Hällfors H., Kervinen M., Koponen S. A novel earth observation based ecological indicator for cyanobacterial blooms // International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation. 2018. V. 64. P. 145–155. doi: 10.1016/j.jag.2017.09.007

7. Kutuyavina T.I., Domnina E.A., Ashikhmina T.Ya., Savinikh V.P. Morphometric, hydro-chemical and biological characteristics of the ponds of the North-East of Kirov region // Theoretical and Applied Ecology. 2013. No. 2. P. 50–55 (in Russian). doi: 10.25750/1995-4301-2013-2-050-055

8. Kataev M.Yu., Bekerov A.A. Detection technique for water bodies using multispectral satellite measurements // Doklady TUSURa. 2017. V. 20. No. 4. P. 105–108 (in Russian). doi: 10.21293/1818-0442-2017-20-4-105-108

9. Ji L., Zhang L., Wylie B. Analysis of dynamic thresholds for the Normalized Difference Water Index // Photogrammetric Engineering & Remote Sensing. 2009. V. 75. No. 11. P. 1307–1317. doi: 10.14358/PERS.75.11.1307

10. Sun F., Sun W., Chen J., Gong P. Comparison and improvement of methods for identifying waterbodies in remotely sensed imagery // International Journal of Remote Sensing. 2012. V. 33. No. 21. P. 6854–6875. doi: 10.1080/01431161.2012.692829

11. Adamovich T.A., Ashikhmina T.Ya., Kantor G.Ya. Use of various combinations of spectral channels of satellite images from the Landsat 8 satellite for an assessment of natural environments and objects (review) // Theoretical and Applied Ecology. 2017. No. 2. P. 9–18 (in Russian). doi: 10.25750/1995-4301-2017-2-009-018

12. Datsenko Yu.S. Eutrophication of reservoirs. Hydrological and hydrochemical aspects. Moskva: GEOS, 2007. 252 p. (in Russian).

Идентификация участков массового роста борщевика Сосновского с помощью спектральных индексов по данным Sentinel-2

© 2019. Е. В. Товстик¹, к. б. н., с. н. с., доцент,
Т. А. Адамович¹, к. г. н., доцент,
Т. Я. Ашихмина^{1,2}, д. т. н., профессор, г. н. с., зав. лабораторией,
¹Вятский государственный университет,
610000, Россия, г. Киров, ул. Московская, д. 36,
²Институт биологии Коми НЦ УрО РАН,
167982, Россия, г. Сыктывкар, ул. Коммунистическая, д. 28,
e-mail: tovstik2006@inbox.ru, ttjnadamvich@rambler.ru

В работе описана возможность использования спутниковых снимков среднего пространственного разрешения с космического аппарата Sentinel-2 для идентификации участков массового роста борщевика Сосновского (*Heracleum sosnowskyi* Manden.). Для дешифрирования космических снимков использовали вегетационные индексы NDVI и ClGreen. Расчётные индексы позволили выделить на снимках типы растительности, представляющих значительную часть растительных сообществ Кировской области (лиственные и хвойные породы, луговая растительность), а также моносообщества борщевика Сосновского. Применённый в работе подход к дешифрированию космических снимков показал, что вегетационные индексы ClGreen и NDVI можно использовать для обнаружения и картирования пространственного распределения борщевика Сосновского. Наилучший результат в случае индекса NDVI достигается при использовании весенних снимков (май), так как в этот период идёт активный рост борщевика Сосновского. Индекс хлорофилла ClGreen наиболее информативен при дешифрировании космоснимков, полученных в период цветения борщевика. На основе значений спектральных индексов по данным Sentinel-2 были построены карты-схемы распространения борщевика Сосновского на территории Фалёнского района Кировской области.

Ключевые слова: инвазивные растения, *Heracleum sosnowskyi* Manden., Sentinel-2, дистанционное зондирование Земли, вегетационные индексы, разностный вегетационный индекс NDVI, относительный индекс хлорофилла ClGreen, хлорофилл.

Identification of sites of mass growth of *Heracleum sosnowskyi* Manden. using spectral indices according to Sentinel-2 images

© 2019. E. V. Tovstik¹ ORCID: 0000-0003-1861-6076
T. A. Adamovich¹ ORCID: 0000-0002-8684-927X
T. Ya. Ashikhmina^{1,2} ORCID: 0000-0003-4919-0047
¹Vyatka State University,
36, Moskovskaya St., Kirov, Russia, 610000,
²Institute of Biology of Komi Scientific Centre of the Ural Branch
of the Russian Academy of Sciences,
28, Kommunisticheskaya St., Syktyvkar, Komi Republic, Russia, 167982,
e-mail: tovstik2006@inbox.ru, ttjnadamvich@rambler.ru

The paper describes the possibility of using satellite images of medium spatial resolution from the Sentinel-2 spacecraft to identify areas of mass growth of the Sosnovsky hogweed. Vegetation indices NDVI and ClGreen were used to interpret space images. The calculated indices made it possible to identify in the photographs the types of vegetation that represent a significant part of the plant communities of the Kirov region (deciduous and coniferous species, meadow vegetation), as well as the mono-community of the Sosnovsky hogweed. The approach to the interpretation of satellite images used in the work has shown that the vegetative indices ClGreen and NDVI can be used to detect and map the spatial distribution of the Sosnovsky hogweed. The best result in the case of the NDVI index is achieved by using spring shots (May), since during this period there is an active growth of the Sosnovsky hogweed. The index of chlorophyll ClGreen is the most informative one for interpretation of satellite images obtained during hogweed flowering. Based on the values of spectral indices, according to Sentinel-2, maps of the distribution of the Sosnovsky hogweed on the territory of the Falyonsky District of the Kirov Region were constructed.

Keywords: invasive plants, *Heracleum sosnowskyi* Manden, Sentinel-2, earth remote sensing, vegetative indexes, Normalized Difference Vegetation Index, Green Chlorophyll Index, chlorophyll.

С каждым годом борщевик Сосновского (*Heracleum sosnowskyi* Manden) расширяет свою биогеографию [1–5]. Только на территории России с 2011 по 2017 г. произошло его вторжение в 18 регионах [6]. Наиболее остро складывается ситуация вблизи центров его бывшего преднамеренного культивирования, в том числе на территории Кировской области [7].

После утраты статуса сельскохозяйственной культуры и внесения борщевика Сосновского в Отраслевой классификатор сорных растений Российской Федерации, началась активная разработка мер по борьбе с этим сорняком. В Кировской области в 2013 г. распоряжением Правительства области для изучения проблем борьбы с распространением борщевика Сосновского была создана рабочая группа, которая определяла необходимость разработки областной программы для организации борьбы с борщевиком и проведения с этой целью мониторинга распространения борщевика Сосновского. Для более точного обследования территории области предложено использовать космическую съёмку (данные дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ)) [8].

В настоящее время данные ДЗЗ широко используют для крупномасштабного анализа роста растительности, в том числе инвазивных видов [9–14].

Несмотря на ряд проблем, обусловленных одинаковыми спектральными коэффициентами отражения растительности, их классификацию на снимках проводят посредством определения фенологических характеристик растительности на основе временных рядов спектральных переменных спутниковых данных, а также расчёта различных вегетационных индексов [15–17]. Известно, что расчёт индексов базируется на двух наиболее стабильных и независимых от прочих факторов участках кривой спектральной отражательной способности растений. На красную зону спектра (0,62–0,75 мкм) приходится максимум поглощения солнечной радиации хлорофиллом, а на ближнюю инфракрасную зону (0,75–1,30 мкм) – максимальное отражение энергии клеточной структурой листа. В связи с этим высокий уровень фотосинтетической активности, как правило, связанный с большой биомассой растительности, проявляется в низких значениях коэффициента отражения в красной зоне спектра и высоких – в ближней инфракрасной. Отношение значений этих показателей позволяет чётко отделять растительность от прочих природных объектов [18–19].

Кроме этого, стадия пика цветения растений может быть легко распознана на снимках, так как цветение растений может напрямую изменять отражательную способность на некоторых длинах волн [20].

Для контроля зон произрастания борщевика Сосновского возможность использования данных ДЗЗ определяется его ранним началом роста весной, быстрым формированием плотного навеса, а также цветением с формированием крупных белых соцветий [21].

Цель работы – использование спектральных индексов NDVI и ClGreen для мониторинга участков массового роста борщевика Сосновского.

Объекты и методы

Мониторинговые исследования участков массового роста борщевика Сосновского проводили на территории Фалёнского района Кировской области. Исследуемая территория входит в состав подзоны южной тайги европейской части северо-востока России, характеризующейся умеренно континентальным типом климата.

Для идентификации участков, занятых борщевиком Сосновского, использовали данные ДЗЗ с космического аппарата Sentinel-2 (Европейское космическое агентство). Данный спутник оснащён мультиспектральным прибором (MSI), позволяющим вести съёмку в 13-и спектральных каналах, охватывающим спектральную область (VNIR / SWIR) от видимого и ближнего инфракрасного до коротковолнового инфракрасного диапазонов [22–23]. Возможность использования данных ДЗЗ с космического аппарата Sentinel-2 для изучения растительности определяется наличием 3-х спектральных каналов на «красной границе», которые очень чувствительны к наличию хлорофилла в растениях.

Поскольку временные ряды NDVI для разных видов растительности в течение межвегетационного периода не обеспечивают чёткого фенологического разделения, поэтому в исследовании применяли изображения, полученные за вегетационный период с мая по октябрь [24]. В работе использовали доступные снимки исследуемой территории с пространственным разрешением 10 м: весна 25.05.2017, 17.05.2018, 22.05.2018; лето 13.08.2017, 23.08.2017, 1.07.2018, 31.07.2018; осень 2.09.2017, 12.10.2017, 24.09.2018.

Расчёт вегетационных индексов проводили с использованием четырёх спектральных

каналов (2, 3, 4 и 8) с пространственным разрешением 10 м. Использовали нормализованный разностный вегетационный индекс NDVI (Normalized Difference Vegetation Index). Данный безразмерный индекс описывает разницу между ближней инфракрасной (NIR) и красной (RED) частями электромагнитного спектра (диапазоны 0,72–1,10 и 0,58–0,68 мкм соответственно) [25]. Положительные значения данного индекса указывают на зелёную поверхность с растительностью, при этом наибольшие значения коррелируют с наибольшей зелёной биомассой. Отрицательные значения NDVI указывают на поверхность без растительного покрова. Индекс NDVI рассчитывали по формуле 1:

$$NDVI = \frac{NIR - RED}{NIR + RED}, \quad (1)$$

где NIR – отражение в ближней инфракрасной области спектра (канал 8); RED – отражение в красной области спектра (канал 4) [26].

Наряду с индексом NDVI, в работе использовали относительный индекс хлорофилла ClGreen (Green Chlorophyll Index), являющийся показателем фотосинтетической активности растительного покрова [27, 28]. Наибольшие значения индекса ClGreen коррелируют с наибольшим содержанием хлорофилла в листьях растений. Индекс ClGreen рассчитывали по формуле 2:

$$ClGreen = \frac{NIR}{GREEN} - 1, \quad (2)$$

где GREEN – отражение в зелёной области спектра; NIR – отражение в ближней инфракрасной области спектра.

Временные ряды NDVI и ClGreen строили для 4-х типов растительности, представляющих значительную часть растительных сообществ Кировской области: лиственные и хвойные породы, луговая растительность и моносообщества борщевика Сосновского.

Методика картирования участков массового роста борщевика Сосновского на основе использования спектральных вегетационных индексов включала в себя следующие этапы:

- подбор космических снимков на территорию объекта исследования и их предварительную обработку;
- анализ фактических данных по произошедшим изменениям, предварительный выбор индексов;
- расчёт спектральных индексов и выбор из них наиболее оптимальных;

– картирование участков массового роста борщевика Сосновского на основе расчётных индексов.

Результаты и обсуждение

Известно, что в течение вегетационного периода растения проходят определённые фенологические фазы развития. Происходящие при этом изменения отражаются на сезонной динамике их вегетационных индексов. По результатам проведённых исследований, расчётные значения индекса NDVI для 4-х классов исследуемой растительности были ниже в осенние (октябрь), чем в весенние (май) и летние (август) месяцы (рис. 1 а). Независимо от типа классифицируемой растительности, средние значения индекса NDVI в начале мая, были ниже, по сравнению со значениями индекса в июле (рис. 1 б).

Аналогичную картину наблюдали и в случае с индексом хлорофилла ClGreen, значения которого независимо от типа классифицируемой растительности в летние месяцы (июль, август) были выше, чем в весенние (май) (рис. 2 а, б).

Следует отметить близкие значения индекса NDVI для всех типов классифицируемой растительности в конце мая 2017 г. и их разброс в аналогичный период 2018 г. Данный факт, по-нашему мнению, может быть связан с погодными условиями (рис. 3 а, б) [29]. Несмотря на то, что погода в весенние месяцы (апрель и май) 2018 г. была теплее, чем в аналогичный период 2017 г., в связи с большим количеством осадков средняя высота снежного покрова на исследуемой территории в мае 2018 г. составила 6,5 см, тогда как в 2017 г. снежного покрова в мае уже не было. Возможно, наличие снежного покрова на исследуемой территории в мае 2018 г. привело к задержке роста луговой растительности и, соответственно, снижению значений индекса NDVI в конце мая 2018 г. по сравнению с 2017 г.

Следует отметить, что как в 2017 г., так и в 2018 г. значения индекса NDVI для классифицируемой растительности коррелировали со средними значениями температуры воздуха.

Проведение анализа временных рядов индекса хлорофилла ClGreen для борщевика Сосновского также позволило идентифицировать участки его массового роста в период с конца июля по сентябрь включительно. Средние значения индекса ClGreen для борщевика с конца июля по конец августа были значительно ниже значений, рассчитанных для луговой расти-

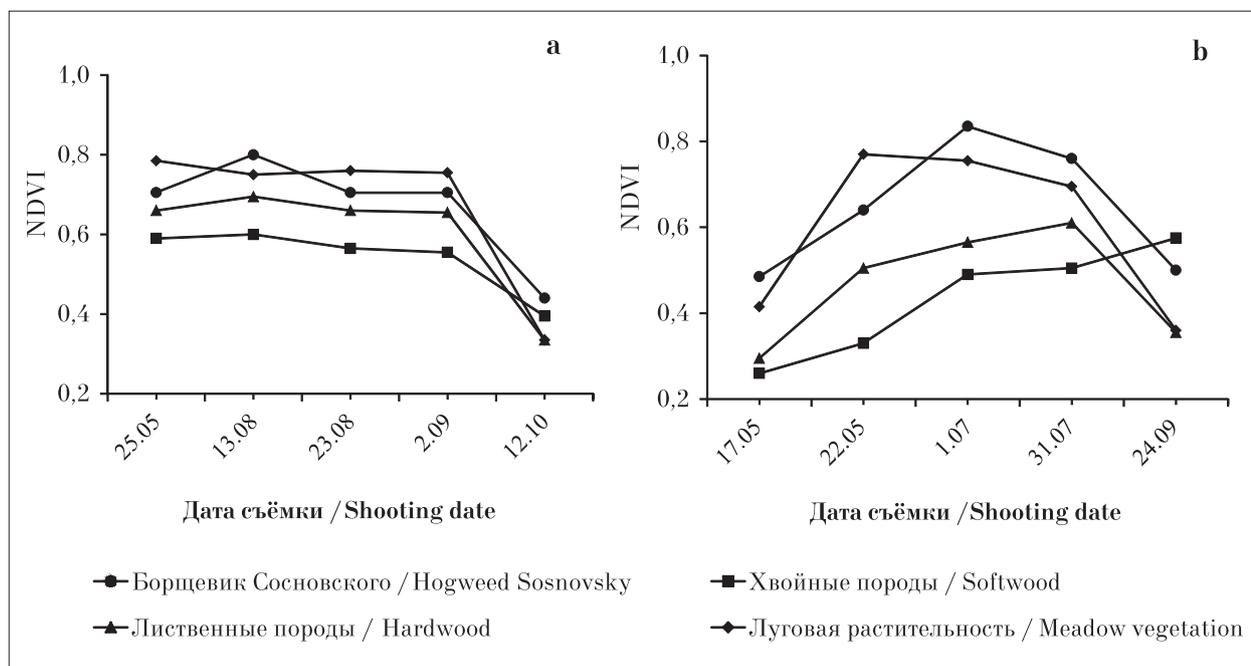


Рис. 1. Кривые динамики индекса NDVI для исследуемых классов растительности в 2017 г. (a) и 2018 г. (b)
 Fig. 1. Dynamics curves of the NDVI index for the studied vegetation classes in 2017 (a) and 2018 (b)

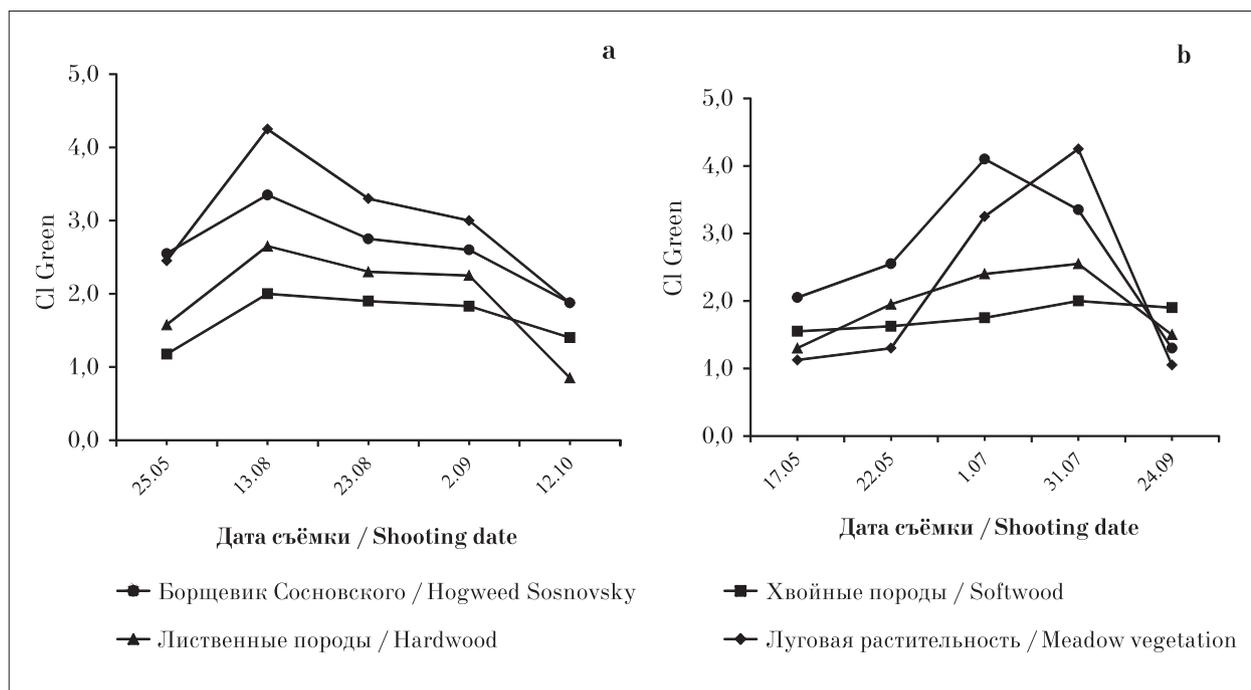


Рис. 2. Кривые динамики индекса ClGreen для исследуемых классов растительности в 2017 г. (a) и 2018 г. (b)
 Fig. 2. Dynamics curves of the ClGreen index for the studied vegetation classes in 2017 (a) and 2018 (b)

тельности (рис. 4 а, b, см. цветную вкладку). В сентябре отмечали противоположную картину: средние значения ClGreen для борщевика были выше, чем для луговой растительности (рис. 4 с, d, см. цветную вкладку).

Известно, что суммарная энергия солнечного излучения, поглощаемая листьями растений, напрямую связана с количеством в них хлорофилла. По мере накопления хлорофилла в ходе вегетативного развития растений

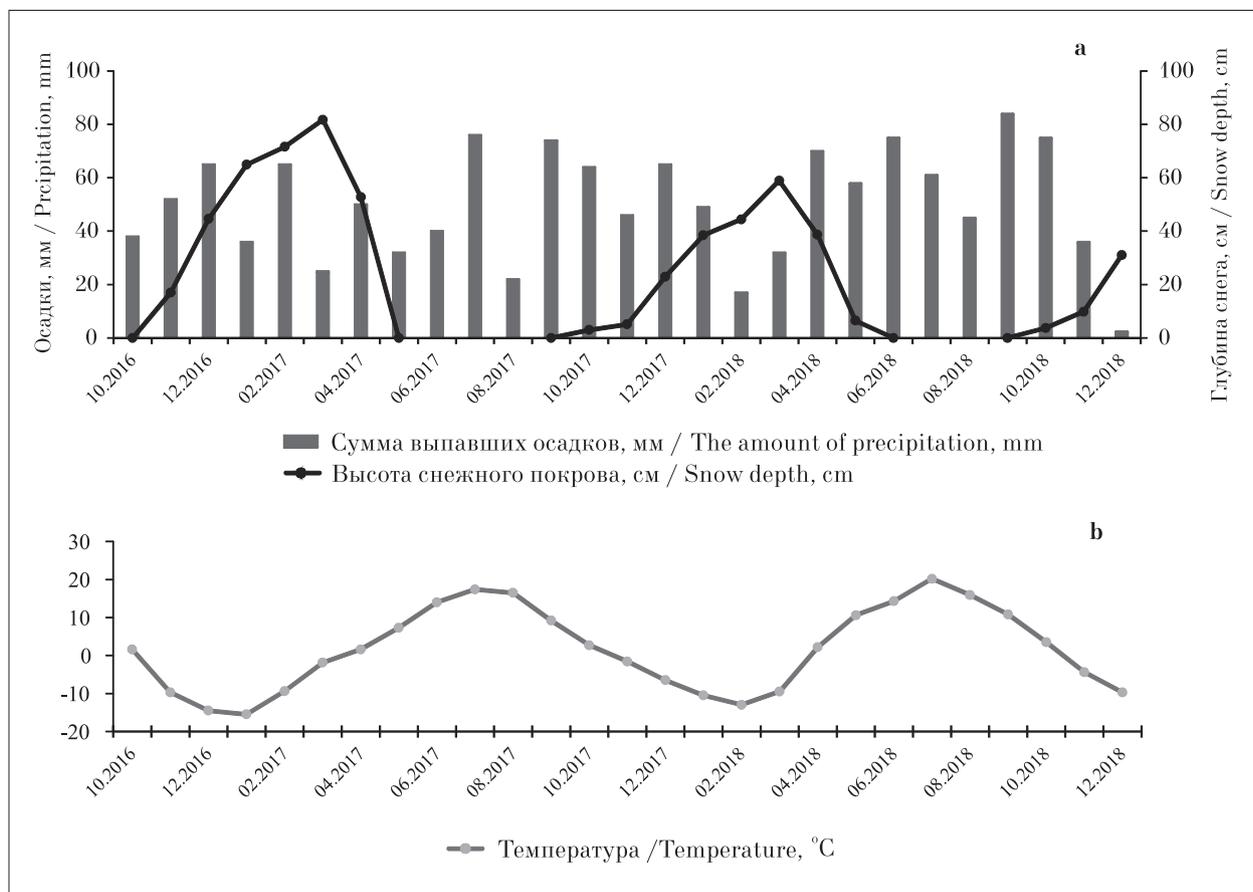


Рис. 3. Сумма выпавших осадков, высота снежного покрова по месяцам (а), среднемесячная температура воздуха (б) на исследуемой территории
Fig. 3. The sum of precipitations, height of snow cover on months (a), average monthly air temperature (b) in the explored territory

и увеличения их биомассы происходит понижение яркости растений в видимой части спектра и напротив её увеличение в инфракрасной части спектра. В осенние месяцы в результате разрушения хлорофилла наблюдается обратная картина. В нашем случае особенно отчётливо данную зависимость для борщевика, по сравнению с лиственными породами и луговой растительностью, прослеживали на снимках, полученных в сентябре.

Известно, что борщевик Сосновского после перезимовки начинает расти сразу после схода снега. Таким образом, с начала мая до конца июня – начала июля наблюдается активный набор биомассы борщевиком. Данную зависимость отчётливо прослеживали на снимках за 2018 г., на которых отмечали резкое увеличение средних значений индекса NDVI за короткий промежуток времени с 17 по 22 мая 2018 г. (рис. 1 б). Несмотря на то, что данная зависимость наблюдалась не только для борщевика Сосновского, но и для всех типов классифицируемой растительности, средние значения индекса NDVI в начале мая для

борщевика Сосновского были выше, чем для прочей растительности (рис. 5, см. цветную вкладку).

Таким образом, особенности быстрого роста борщевика Сосновского на начальных стадиях онтогенеза позволяют идентифицировать участки его массового роста на снимках, полученных в мае.

Основываясь на том, что цветение борщевика Сосновского происходит с конца июня и/или начала июля до середины августа, проводили анализ временных рядов NDVI за этот период. В результате было установлено, что в период цветения борщевика Сосновского (июль–начало августа) – средние значения индекса NDVI для него достигали максимума (0,76–0,84), тогда как для прочей растительности в этот период они были ниже (0,69–0,76).

Следует отметить, что расчётные значения индекса NDVI и индекса хлорофилла ClGreen для борщевика Сосновского, в отличие от других классов растительности, по всем датам съёмки коррелировали между собой ($r = 0,92$).

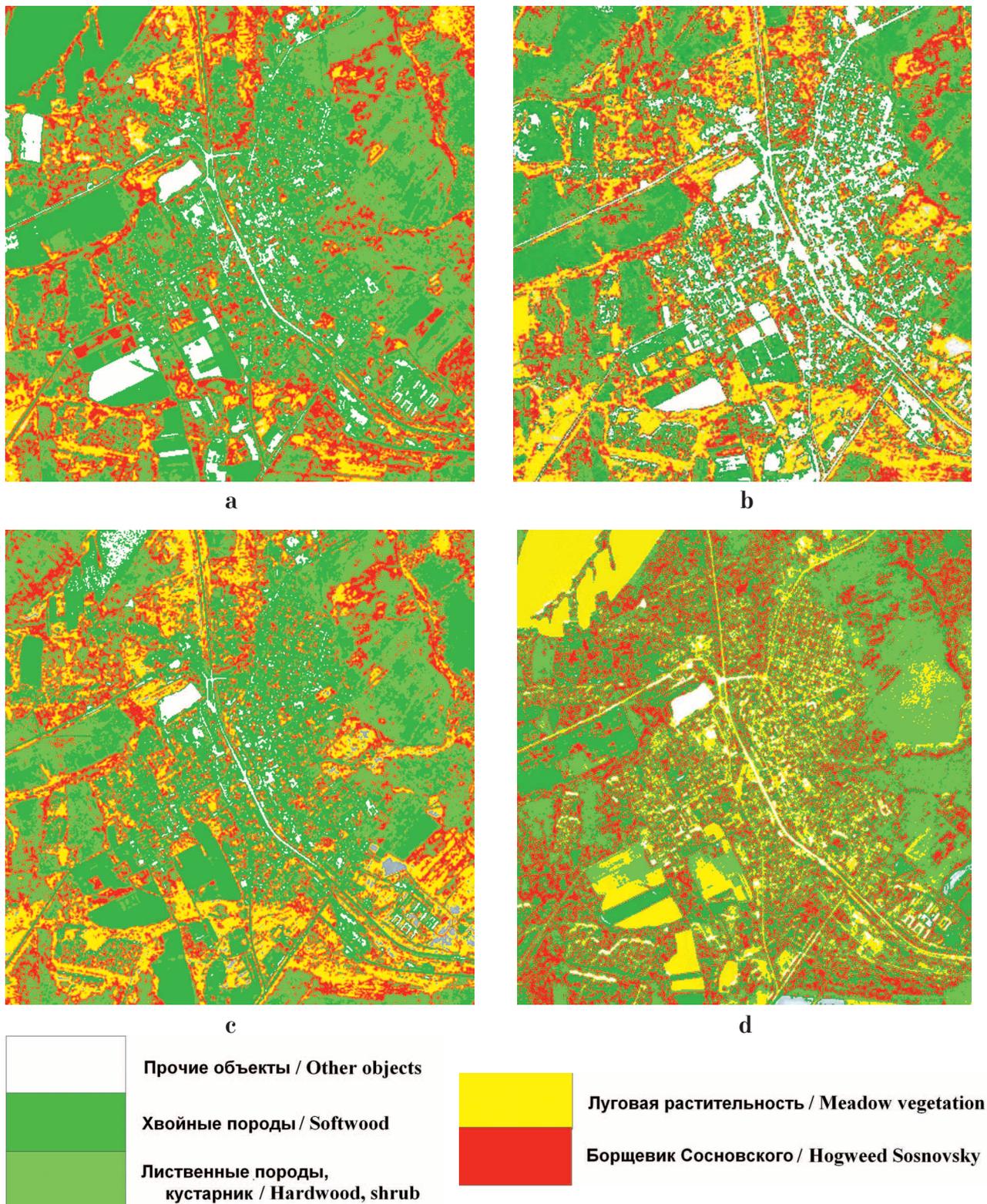


Рис. 4. Изменение пространственного распределения индекса ClGreen в конце июля (а) и августа (б), в начале (в) и конце сентября (г) для исследуемых классов растительности

Fig. 4. Changes in the spatial distribution of the ClGreen index at the end of July (a) and August (b), at the beginning (c) and end of September (d) for the vegetation classes studied

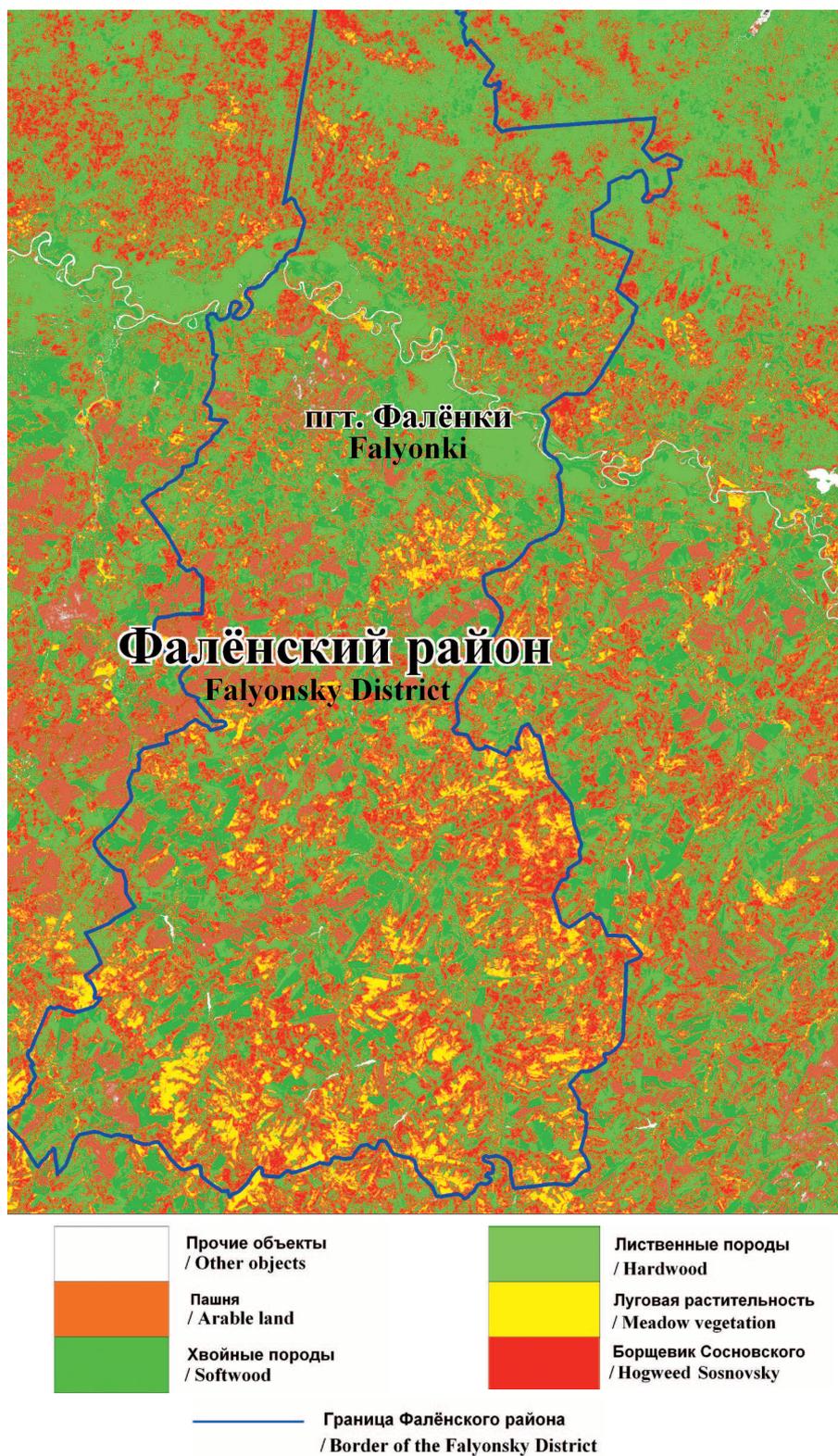


Рис. 5. Карта-схема пространственного распределения индекса NDVI на территории Фалёнского района (снимок от 22 мая 2018 г.)
Fig. 5. Map of the spatial distribution of the NDVI index on the territory of the Falyonsky District (photo dated May 22, 2018)

Заключение

Таким образом, в результате исследований было проведено дешифрирование серии космических снимков с аппарата Sentinel-2 за период 2017–2018 гг. территории Фалёнского района Кировской области. По результатам обработки космоснимков были рассчитаны нормализованный разностный вегетационный индекс NDVI и индекс хлорофилла CIGreen. По средним значениям вегетационных индексов для 4-х типов растительных сообществ (луговая растительность, хвойные и лиственные породы, моносообщества борщевика Сосновского) построены кривые динамики. На основе расчётных спектральных индексов NDVI и CIGreen удалось идентифицировать участки массового роста борщевика Сосновского.

Наиболее информативными для мониторинга борщевика Сосновского явились космоснимки за май и июль-август, когда происходит активный рост борщевика Сосновского и его цветение соответственно. В мае и летний период расчётные значения вегетационных индексов для борщевика Сосновского коррелируют между собой и, по сравнению с другими типами растительных сообществ, принимают наибольшие значения.

На основании полученных в ходе работы данных были построены карты-схемы пространственного распределения индекса NDVI и содержания хлорофилла по индексу CIGreen, на которых выявлены участки произрастания борщевика Сосновского.

Работа выполнена при поддержке гранта Президента Российской Федерации для государственной поддержки молодых учёных – кандидатов наук (МК-2880.2018.5).

References

1. Soltysiak J., Brej T., Tomczyk M. Invasion of the Sosnowsky hogweed (*Heracleum sosnowskyi* Manden.) in *Siechnice commune* (South-western Poland) and prospects of its eradication // Scientific Papers of Wrocław University of Life Sciences – Biology and Animal Breeding. 2015. V. 78. No. 610. P. 73–86.

2. Chadin I., Dalke I., Zakhochiy I., Malyshev R., Madi E., Kuzivanova O., Kirillov D., Elsakov V. Distribution of the invasive plant species *Heracleum sosnowskyi* Manden. in the Komi Republic (Russia) // PhytoKeys. 2017. No. 77. P. 71–80. doi: 10.3897/phytokeys.77.11186

3. Stojanovic V., Petrovic S., Kovacevic J., Stojanovic D., Bjedov I. *Heracleum pinewood* Manden. (Apiaceae): A new invasive species in the flora of Serbia // Glasnik Spumar-

skog faculteta. 2017. No. 116. P. 215–220. doi: 10.2298/GSF1716215S

4. Baranova O.G., Brelgina E.N. Invasive plant species in three cities of the Udmurt Republic // Rossiyskiy zhurnal biologicheskikh invaziy. 2015. No. 4. P. 14–21 (in Russian).

5. Gusev A.P. Landscape-ecological analysis of the spread of alien transforming species in natural and anthropogenic landscapes (southeast of Belarus) // Rossiyskiy zhurnal prikladnoy ekologii. 2017. No. 2. P. 47–51 (in Russian).

6. Dalke I.V., Chadin I.F., Zakhochiy I.G. Control of Sosnowskyi's Hogweed (*Heracleum sosnowskyi* Manden.) invasion on the territory of the Russian Federation // Russian Journal of Biological Invasions. 2018. V. 9. No. 4. P. 311–344. doi: 10.1134/S2075111718040045

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

8. Information on the preparation of measures to combat the spread and liquidation of the poisonous plant “Borshevik Sosnovsky” in the territory of the Kirov region [Internet resource] <http://www.zsko.ru/> (Accessed: 17.05.2019).

9. Ryzhikov D.M. Method of processing multispectral satellite data for solving the problem of monitoring the habitats of the Sosnovsky Hogweed // Informatsionno-upravlyayushchie sistemy. 2017. No. 6. P. 43–51 (in Russian). doi: 10.15217/issn1684-8853.2017.6.43

10. Tovstik E.V., Adamovich T.A., Rutman V.V., Kantor G.Ya., Ashikhmina T.Ya. Identification of the thickets of *Heracleum sosnowskyi* using Earth remote sensing data // Theoretical and Applied Ecology. 2018. No. 2. P. 35–37 (in Russian). doi: 10.25750/1995-4301-2018-2-035-037

11. Rocchini D., Andreo V., Förster M., Garzon-Lopez X.C., Gutierrez A.P., Gillespie T.W., Hauffe H.C., He K.S., Kleinschmit B., Mairota P., Marcantonio M., Metz M., Nagendra H., Pareeth S., Ponti L., Ricotta C., Rizzoli A., Schaab G., Zebisch M., Zorer R., Neteler M. Potential of remote sensing to predict species invasions: A modelling perspective // Progress in Physical Geography: Earth and Environment. 2015. V. 39. No. 3. P. 283–309. doi: 10.1177/0309133315574659

12. Adamovich T.A., Domnina E.A., Timonov A.S., Rutman V.V., Ashikhmina T.Ya. Methodological techniques for identifying plant communities based on Earth remote sensing data and field research // Theoretical and Applied Ecology. 2019. No. 2. P. 39–43 (in Russian). doi: 10.25750/1995-4301-2019-2-039-043

13. Zinchenko V.E., Lokhmanova O.I., Kalinichenko V.P., Glukhov A.I., Povkh V.I., Shlyakhova L.A. Space monitoring of agricultural land in the south of Russia // Issledovanie Zemli iz kosmosa. 2013. No. 3. P. 33–44 (in Russian). doi: 10.7868/S0205961413030068

14. Yang C. A high-resolution airborne four-camera imaging system for agricultural remote sensing // *Comput Electron Agric.* 2012. V. 88. P. 13–24. doi: 10.1016/j.compag.2012.07.003
15. Yan E., Wang G., Lin H., Xia C., Sun H. Phenology-based classification of vegetation cover types in Northeast China using MODIS NDVI and EVI time series // *International Journal of Remote Sensing.* 2015. V. 36 (2). P. 489–512. doi: 10.1080/01431161.2014.999167
16. Miklashevich T.S., Bartalev S.A. Method for determining the phenological characteristics of vegetation based on the time series of satellite data // *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa.* 2016. V. 13. No. 1. P. 9–24 (in Russian). doi: 10.21046/2070-7401-2016-13-1-9-24
17. Volkov A., Parinova T. Thematic interpretation of the Northern Dvina River floodplain meadow ecosystem using remote sensing // *BIO Web of Conferences.* 2018. V. 11. No. 00045. P. 1–3. doi: 10.1051/bioconf/20181100045
18. Tuddenham W.G., Le Marshall J.F. The interpretation of NDVI data and the potential use of a differential technique for monitoring time sequential changes in vegetation cover // *Proceedings of the 2nd Australian Conference on Agricultural Meteorology.* Brisbane, Australia, 1996. P. 57–61.
19. Cridland S., Burnside D., Smith R. The NDVI – use in rangeland management // *In Proceeding of the 5th International Rangelands Congress.* Salt Lake City, Utah, 1995. P. 105–106.
20. Kogan F.N. Vegetation index for areal analysis of crop conditions / Preprints, Proc. 18th conf. of Agricultural and Forest Meteorology, West Lafayette, IN, Amer. Meteor. Soc., 1987. P. 103–107.
21. Ge S., Everitt J., Carruthers R., Gong, P., Anderso G. Hyperspectral characteristics of canopy components and structure for phenological assessment of an invasive weed // *Environ. Monit. Assess.* 2006. V. 120. P. 109–126. doi: 10.1007/s10661-005-9052-1
22. Drusch M., Del Bello U., Carlier S., Colin O., Fernandez V., Gascon F., Hoersch B., Isola C., Laberinti P., Martimort P., Meygret A., Spoto F., Sy O., Marchese F., Bargellini P. Sentinel-2: ESA's optical high-resolution mission for GMES operational services // *Remote Sensing of Environment.* 2012. V. 120. P. 25–36. doi: 10.1016/j.rse.2011.11.026
23. Vrieling A., Meroni M., Darvishzadeh R., Skidmore A.K., Wang T., Zurita-Milla R., Oosterbeek K., O'Connor B., Paganini M. Vegetation phenology from Sentinel-2 and field cameras for a Dutch barrier island // *Remote Sensing of Environment.* 2018. V. 215. P. 51–529. doi: 10.1016/j.rse.2018.03.014
24. Senay G.B., Elliott R.L. Combining AVHRR-NDVI and landuse data to describe temporal and spatial dynamics of vegetation // *Forest Ecology and Management.* 2000. V. 128. P. 83–91. doi: 10.1016/S0378-1127(99)00275-3
25. Earth observatory. Measuring Vegetation. Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) [Internet resource] <https://earthobservatory.nasa.gov/> (Accessed: 15.04.2019).
26. Myneni R.B., Hall F.G., Sellers P.J., Marshak A.L. The interpretation of spectral vegetation indexes // *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing.* 1995. V. 33. P. 481–486.
27. Curran P.J., Durgan J.L., Gholz H.L. Exploring the relationship between reflectance red edge and chlorophyll content in slash pine // *Tree Physiol.* 1990. V. 7. P. 33–48. doi: 10.1093/treephys/7.1-2-3-4.33
28. Moran J.A., Mitchell A.K., Goodmanson G., Stockburger K.A. Differentiation among effects of nitrogen fertilization treatments on conifer seedlings by foliar reflectance: a comparison of methods // *Tree Physiol.* 2000. V. 20. P. 1113–1120. doi: 10.1093/treephys/20.16.1113
29. Weather in Falenki [Internet resource] <https://rp5.ru/> (Accessed: 19.05.2019).

Тяжёлые металлы в системе почва–растение в биогеоценозах Большеземельской тундры

© 2019. Г. Я. Елькина, д. с.-х. н., с. н. с., С. В. Денева, к. б. н., н. с.,
Е. М. Лаптева, к. б. н., доцент, врио зав. отделом почвоведения,
Институт биологии Коми научного центра Уральского отделения РАН,
167982, ГСП-2, Россия, г. Сыктывкар, ул. Коммунистическая, д. 28,
e-mail: elkina@ib.komisc.ru

Содержание тяжёлых металлов (ТМ) во мхах, преобладающих в биогеоценозах Большеземельской тундры (Воркутинский район), представлено рядом $Zn > Ni > Cu > Pb > Co > Cd$, в лишайниках – $Zn > Pb > Ni > Cu > Co > Cd$. Доминирование мхов способствует замедленному кругообороту элементов и длительной их консервации в мортмассе. В большей степени ТМ аккумулируются в хорошо разложенных растительных остатках (в органических горизонтах тундровых почв). Аккумуляция Zn и Cd в споровых растениях определяется уровнем атмосферного загрязнения. Ранжирование ТМ в почве под разными растительными группировками в основном совпадает с их распределением в доминантных видах растений. Различия в распределении ТМ по профилю почвы связаны с физико-химическими особенностями элементов, со спецификой окислительно-восстановительного режима почв, обусловленного наличием мерзлоты и явлениями криотурбации, а также зависят от состава растительных сообществ. Валовые формы большинства ТМ аккумулируются в верхней части почвенного профиля. Приведено содержание ТМ в растениях, запасы их в растительном органическом веществе.

Ключевые слова: тяжёлые металлы, биогеохимический круговорот, Большеземельская тундра, биогеоценоз, биомасса.

Heavy metals in soil–plant system in biogeocenoses of the Bolshezemelskaya Tundra

© 2019. G. Ya. El'kina ORCID: 0000-0001-7511-9290, S. V. Deneva ORCID: 0000-0002-1813-7799,
E. M. Lapteva ORCID: 0000-0002-9396-7979,
Institute of Biology of Komi Scientific Center of the Ural Branch of RAS,
28, Kommunisticheskaya St., Syktyvkar, Russia, 167982,
e-mail: elkina@ib.komisc.ru

Biological cycle, content, and stocks of heavy metals in plant organic matter are an interesting study topic for both ecological description of biogeocenoses and ecological monitoring. The biocenosis includes three plant communities as dwarf shrub-mossy (65.6), dwarf shrub-lichen-mossy (17.9), and dwarf shrub-lichen (16.5% of total area) communities. Soils are Histic Turbic Cryosols under dwarf shrub-mossy community and Histic Cryosols under lichens. Weight fraction of elements in samples was measured by the method of atomic-emission spectrometry with inductively coupled plasma SPECTROARCOS. Soil samples for total ratio of elements were treated by the microwave frequency mineralizer Minotavr 2 (Russia, Lumex Ltd). Mobile forms were carried out of soil samples with the help of 1N ammonium acetate buffer solution (AAB) with pH 4.8 for exchange forms, and an outflow in acid digest (1M HCl extract) for acid-soluble forms. Heavy metals in plants were assessed after they had been decomposed using nitric acid-hydrogen peroxide mixture in the microwave frequency mineralizer Minotavr 1 for the method of spectrometry with inductively coupled plasma (PND F 16.1:2.3:3.11-98).

Copper and zinc have a high, cadmium – mean, and cobalt, nickel, lead – low frequency rate of biological cycle. Frequency rate of cycle for the majority of elements in lichen communities is high in contrast to leafy moss communities. Mosses slow down cycle of elements and hold them in dead material for long time. Composition of elements in soils under communities normally is the same as that in plants. Organic soil horizon of tundra biocenoses should be considered as a surface soil-geochemical barrier with a slow elemental cycle. Mineral soil part has high concentrations of zinc and low – of cadmium. Besides, concentrations of copper, zinc, nickel, and cadmium is similar to worldwide mean values but concentrations of cobalt and lead slightly exceed them. Differences in profile distribution of elements relate to physical-chemical properties of elements, complex redox conditions of soils due to permafrost and cryoturbation processes. Also, they depend on composition of plant communities.

Keywords: heavy metals, biogeochemical cycle, Bolshezemelskaya Tundra, biogeocenosis, biomass.

Воркутинский район Республики Коми входит в состав арктической зоны Российской Федерации. Здесь представлены ландшафты с кислым глеевым классом миграции [1] и массивно-островным [2] характером залегания многолетнемерзлых пород. До настоящего времени изучению взаимосвязей между содержанием тяжёлых металлов (ТМ) в системе «почва–растение» Большеземельской тундры (БЗТ) уделялось недостаточно внимания [3, 4], сведения о содержании некоторых из микроэлементов на данный момент отсутствуют. Выявление же закономерностей в распределении ТМ в такой системе актуально как для характеристики геохимических особенностей тундровых биогеоценозов, так и для проведения экологического мониторинга, особенно в связи с промышленным освоением арктических территорий и наблюдаемыми изменениями климата.

Цель работы – оценка запасов и особенностей аккумуляции в составе растительных сообществ и почвах типичных ландшафтов Большеземельской тундры микроэлементов (цинк, медь, кобальт), жизненная необходимость которых для растений установлена, и элементов (никель, свинец и кадмий), роль которых в растениях до конца не ясна, выявление параметров их биологического круговорота.

Объекты и методы исследований

Район исследования (67°35,4' с. ш., 64°09,9' в. д., абсолютная высота 150 м над ур. м.) приурочен к окрестностям г. Воркута, где на водоразделах распространены характерные для юго-востока БЗТ гряды-мусюры. Исследования проводили в пределах склона мусюра юго-юго-западной экспозиции с небольшим (около 3°) уклоном. Растительный покров участка образуют три группы сообществ – кустарничково-лишайниковое (КЛ), кустарничково-лишайниково-моховое (КЛМ) и кустарничково-моховое (КМ). Из кустарников встречаются *Salix phylicifolia* и *Betula nana*, кустарничков – *Vaccinium uliginosum* и *V. vitis-idaea*. Травянистая растительность, в основном, представлена *Carex globularis* и *Festuca ovina*. В напочвенном покрове преобладают гипновые зелёные мхи (*Hylocomium splendens*). Пятнами встречаются лишайники (*Cetraria islandica* и *C. nivalis*, а также *C. cucullata*, *Cladonia randiferina*, *Cladonia gracilis*).

Почвенный покров – комплексный, представлен сочетанием глеезёмов криотурбиро-

ванных (Histic Turbic Cryosol) и торфяно-глеезёмов (Histic Cryosol Reductaquic). Глеезёмы криотурбированные формируются под КЛ и КЛМ сообществами, мощность их органогенного горизонта – до 5 см, сезонно-талого слоя (СТС) – 0,9 м. Спецификой минеральной части профиля в условиях преобладания восстановительной обстановки являются: тиксотропия, оглеение; максимальная выраженность криотурбаций, наряду с которыми имеют место перераспределение, сортировка компонентов и криокоагуляционная агрегация органического вещества на границе органогенных горизонтов с минеральной толщей. Торфяно-глеезёмы развиты под КМ сообществами. Их профиль отличается более активным торфонакоплением (мощность органогенного горизонта достигает 15–24 см), наличием близко залегающей мерзлоты (мощность СТС не превышает 0,6–0,7 м), более интенсивным оглеением и тиксотропностью минеральных горизонтов.

Структуру и запасы фито- и мортмассы оценивали в соответствии с методическими указаниями [5]. Мортмасса (отмершие растительные остатки разной степени разложения) формирует органогенный горизонт почв биогеоценозов. В пределах мортмассы выделены слои с разной степенью деструкции: слабо, средне и хорошо разложившиеся.

Для определения мозаичности растительных сообществ и вклада различных групп сообществ в запасы фитомассы закладывали трансекту (10 м²) с выделением пробных площадок для учёта биомассы (2 м²). Расчёт запасов ТМ в растительном органическом веществе производили путём умножения массы структурных компонентов на единице площади на содержание в них того или иного элемента.

Образцы почв для физико-химических исследований отбирали под разными растительными группировками. Массовую долю ТМ в пробах измеряли методом атомно-эмиссионной спектроскопии с индуктивно связанной плазмой SPECTROARCOS. Разложение проб почв для определения валового содержания ТМ проводили методом микроволнового вскрытия с использованием СВЧ-минерализатора «Минотавр-2» (Россия, ООО «Льюмэкс»). Подвижные формы ТМ экстрагировали раствором 1н HCl и ацетатно-аммонийным буферным раствором (ААБ) с pH 4,8 ед. Определение ТМ в растениях осуществляли после разложения смесью азотной кислоты и перекиси водорода на СВЧ-минерализаторе «Минотавр-1» мето-

дом спектрометрии с индуктивно-связанной плазмой (ПНД Ф 16.1:2.3: 3.11-98).

Названия почв даны в соответствии с классификацией и диагностикой почв России [6] и системой мировой базы почвенных ресурсов [7].

Результаты и обсуждение

Аккумуляция минеральных элементов в биоценозах в значительной мере определяется величиной сформировавшейся биомассы и скоростью биологического круговорота [8]. Максимальные запасы фитомассы (29,0 т/га) сосредоточены в КМ сообществе. На 57,3% они представлены мхами. Доминирование мхов ведёт к замедленному биологическому круговороту: мортмасса (103,1 т/га) значительно превышает массу живых растений. Минимальный запас фитомассы (15,7 т/га) формируется в КЛ биоценозе, доля лишайников в нем составляет 76,1%. Запас мортмассы в сообществе с лишайниками также не высок – 28,3 т/га.

В растениях тундровых сообществ наиболее велико содержание цинка, менее всего кадмия (табл. 1). В большей степени цинк на-

капливается в кустарниках, особенно *S. phylicifolia*, минимальные количества его, а также Cu характерны для лишайников. Максимум содержания Cu приходится на побеги *Vaccinium uliginosum*. Свинец и никель в большем количестве содержатся в споровых растениях. Максимальное количество Cd приходится на побеги и листья *Salix phylicifolia* (1,3–2,2 мг/кг). Травянистые растения характеризуются очень низким содержанием кадмия. Поскольку корни сдерживают поступление токсичных элементов в растения, содержание элементов в корнях трав выше. Наиболее значительная разница между содержанием ТМ в корнях и надземной массе характерна для меди и свинца.

Преобладающие в биоценозах мхи и лишайники в большей мере содержат Zn, следом идут Cu, Ni, меньше всего в них содержится Cd. При этом цинком и кадмием более богаты листовые мхи, а свинцом – лишайники. Содержание большинства ТМ в лишайниках укладывается в рамки среднемировых значений, количество свинца во мхах, лишайниках и травах, как и кадмия в лишайниках, ниже фоновых значений для европейской территории России [9].

Таблица 1 / Table 1
Содержание тяжёлых металлов в растениях тундровых биоценозов, мг/кг *
The content of heavy metals in plants of tundra biocenoses, mg/kg *

Растение, органы, состояние / Plant, parts of a plant, state	Cu	Pb	Cd	Zn	Ni	Co
Мох / Moss	6,3	3,6	0,47	64	6,5	1,4
Мох слабо разложившийся / Weakly decomposed moss tissues	13,0	10,0	1,10	96	6,9	3,2
Мох средне разложившийся / Medium decomposed moss tissues	16,7	15,0	1,20	95	20,5	5,0
Мох разложившийся / Decayed moss*	16,7	12,7	1,10	71	25,5	9,7
Лишайники / Lichen	4,7	5,2	0,34	23	4,8	1,1
Разложившиеся остатки лишайников Decomposed plant residues of lichens	21,0	16,0	1,40	90	22,5	6,3
Ива, побеги / <i>Salix phylicifolia</i> , shoot	5,2	0,9	2,20	350	3,4	0,6
Ива, листья / <i>S. phylicifolia</i> , leaves	4,0	1,1	1,30	190	3,2	1,1
Ива, корни / <i>S. phylicifolia</i> , roots	4,7	4,8	1,40	230	4,4	0,7
Берёза, побеги / <i>Betula nana</i> , shoot	6,6	1,6	0,23	250	2,8	0,4**
Берёза, листья / <i>B. nana</i> , leaves	4,7	1,4	0,06**	240	2,5	0,4**
Берёза, корни / <i>B. nana</i> , roots	5,4	1,5	0,56	170	2,9	0,4**
Кустарники, отмершие остатки / Shrub, dead residues	5,6	2,3	0,57	160	4,6	1,3
Брусника / <i>Vaccinium vitis-idaea</i>	4,6	0,8	0,40	39	1,6	0,3**
Голубика / <i>V. uliginosum</i>	25,0	1,5	0,52	68	2,2	0,2**
Травы, надземная часть / Grasses, aerial part	4,1	0,5	0,13	60	2,4	0,4**
Травы, корни / Grasses, roots	91,0	7,6	1,10	140	10,0	2,4
Травы, отмершие остатки / Grasses, dead residues	10,0	5,4	0,80	54	9,0	2,8

Примечание: * – относительная погрешность измерения (\pm %): Zn – 20, Cu – 20, Ni – 35, Pb – 25, Cd – 50, Co – 40%; ** – содержание ниже чувствительности метода.

Note: * – relative measurement error (\pm %): Zn – 20, Cu – 20, Ni – 35, Pb – 25, Cd – 50, Co – 40%; ** – the content is lower than the sensitivity of the method.

Таблица 2 / Table 2

Запасы тяжёлых металлов в растительном органическом веществе, кг/га
Stocks of heavy metals in plant organic matter, kg/ha

Биомасса / Biomass	Cu	Pb	Cd	Zn	Ni	Co
Кустарничково-моховое сообщество (65,6% от общей площади) Dwarf shrub-mossy plant community (65.6% from the total area)						
Живые растения / Living plants	0,51	0,11	0,019	3,42	0,19	0,04
Отмершие остатки / Dead residues	1,77	1,43	0,125	9,81	2,22	0,75
Общее содержание / Total content	2,28	1,55	0,144	13,23	2,41	0,79
Кустарничково-лишайниково-моховое сообщество (17,9% от общей площади) Dwarf shrub-lichen-mossy plant community (17.9% from the total area)						
Живые растения / Living plants	0,39	0,11	0,013	2,26	0,16	0,04
Отмершие остатки / Dead residues	1,35	1,14	0,106	5,99	1,78	0,57
Общее содержание / Total content	1,75	1,25	0,118	8,25	1,93	0,60
Кустарничково-лишайниковое сообщество (16,5% от общей площади) Dwarf shrub-lichen community (16.5% from the total area)						
Живые растения / Living plants	0,24	0,09	0,007	0,89	0,09	0,02
Отмершие остатки / Dead residues	0,63	0,46	0,042	2,70	0,67	0,19
Общее содержание / Total content	0,86	0,54	0,049	3,59	0,75	0,21
Тундровое растительное сообщество (в целом) / Tundra plant community (as a whole)						
Живые растения / Living plants	0,45	0,11	0,016	2,79	0,17	0,04
Отмершие остатки / Dead residues	1,51	1,22	0,108	7,95	1,88	0,62
Общее содержание / Total content	1,95	1,33	0,123	10,74	2,05	0,66

Расчёт запасов ТМ показал, что максимум их аккумуляции как в фитомассе, так и в мортмассе характеризуется КМ сообществом (табл. 2). Минимальными значениями отличается биоценоз с преобладанием лишайников. Последнее связано с небольшой биомассой и интенсивной её деструкцией в условиях лучшей теплообеспеченности.

Запасы ТМ в общей массе растительного органического вещества представлены рядом: Zn > Ni > Cu > Pb > Co > Cd, в живых растениях: Zn > Cu > Ni > Pb > Co > Cd. Общей закономерностью для всех растительных группировок и в целом для тундрового сообщества является накопление ТМ в мортмассе (73–95%) по сравнению с фитомассой растений.

Скорость биологического кругооборота ТМ (отношение количества элементов в отмерших растительных остатках к количеству их в органах растений) в основном определяется потребностью растений. Наиболее интенсивный кругооборот характерен для меди (3,4), цинка (2,8), средний – для кадмия (6,8), низкий – для кобальта, никеля и свинца (17,5, 11,4, 11,2 соответственно). Скорость цикла большинства элементов в биоценозах с преобладанием лишайников выше, чем в сообществах с доминированием листостебельных мхов. Присутствие в напочвенном покрове

мхов при незначительном обилии травянистых растений способствует замедленному кругообороту элементов и длительной их консервации в мёртвом веществе.

Верхние органогенные горизонты (отмершие растительные остатки) почв исследуемых тундровых биогеоценозов играют роль окислительно-восстановительного геохимического барьера, в пределах которого происходит концентрация химических элементов. В органогенных горизонтах (табл. 1) содержание Zn, Cu и особенно Cd существенно выше, чем в минеральной толще (табл. 3), Co и Ni – меньше, по содержанию Pb – различий не установлено. В минеральной толще почв наиболее высоким содержанием отличается Zn, наименьшим – Cd (табл. 3). Количество Cu, Zn, Ni и Cd соизмеримо со среднемировыми показателями по почвам [10], Co и Pb – несколько превышает их. Содержание ТМ в минеральных горизонтах почв ниже показателей ПДК и ОДК.

По валовому содержанию в минеральных горизонтах торфяно-глеезёма ТМ можно расположить в следующий ряд: Zn > Ni > Pb > Cu > Co > Cd, глеезёма криотурбированного – Zn > Ni > Pb > Co > Cu > Cd (табл. 3). Ранжирование элементов в почве под разными растительными группировками

МОНИТОРИНГ ПРИРОДНЫХ И АНТРОПОГЕННО НАРУШЕННЫХ ТЕРРИТОРИЙ

в основном совпадает с их распределением в доминантных видах растений (табл. 1, 3). Порядок элементов в глеевом горизонте Ghi, залегающем непосредственно под моховой подстилкой, почти аналогичен ряду элементов во мхах ($Zn > Ni > Cu > Pb > Co > Cd$). Для лишайников характерно более высокое по сравнению со мхами содержание свинца ($Zn > Pb > Ni > Cu > Co > Cd$), и в горизонте Ghi, расположенном под лишайниковой подстилкой, наблюдается тенденция к накоплению этого элемента. Большинство рассматриваемых ТМ аккумулируется в верхней части почвенных профилей до глубины 45–49 см (табл. 3). Наиболее значительна аккумуляция кадмия, особенно в почве под КМ сообществом. Его количество в горизонтах Ghi и G в 1,4–1,6 раза выше, чем в нижележащем горизонте CR. По другим элементам различия составляют в основном 1,1–1,2 раза.

Наиболее высоким содержанием подвижных (извлекаемых 1н HCl) форм Cu, Zn и Ni отличается горизонт Ghi, а Pb и Co –

нижняя часть профиля торфяно-глеезёма. Верхние минеральные горизонты почвы под лишайниковыми сообществами (КЛ), также как и сами лишайники, содержат меньше подвижных форм Zn, Ni и Cu. Горизонт Ghi глеезёма криотурбированного обогащён кобальтом. Распределение соединений, экстрагируемых ААБ в основном аналогично распределению форм, вытесняемых 1н HCl.

Наиболее высокой подвижностью в почвах отличаются **Cu и Pb, 1н раствор HCl** извлекает соответственно 30–35 и 28–34% от их валового содержания. Подвижность остальных элементов составляет 15–25%. В ААБ переходит 5–7% от валового содержания. Причины различий в профильном распределении ТМ, их подвижности заключаются в физико-химических особенностях элементов, сложных окислительно-восстановительных условиях почв, связанных с мерзлотой и явлениями криотурбации, а также в составе растительных сообществ.

Для оценки поглощения элементов сосудистыми растениями используется коэффи-

Таблица 3 / Table 3

Содержание ТМ в минеральной части почвы под разными биоценозами, мг/кг
The content of HM in the mineral part of the soil under different biocenoses, mg/kg

Горизонт, глубина (см) Horizon, depth (cm)	Форма Forms	Zn	Ni	Cu	Pb	Co	Cd
Торфяно-глеезём (кустарничково-моховое сообщество) Histic Turbic Cryosols (dwarf shrub-mossy plant community)							
Ghi, 19–31	Валовое / Total	44	31	14,4	14	10	0,35
	ААБ / ААБ	< 2,5	1,7	0,75	0,79	< 0,1	< 0,1
	1N HCl	8,9	6,6	4,5	4,2	2,2	< 0,1
G, 31–45	Валовое / Total	45	33	14,3	14	12	0,31
	ААБ / ААБ	< 2,5	1,9	0,59	0,84	< 0,1	< 0,1
	1N HCl	8,4	6,7	4,3	4,4	2,3	< 0,1
CR, 69–89	Валовое / Total	39	25	10,4	14	11	0,22
	ААБ / ААБ	< 2,5	1,5	0,65	1,3	0,50	< 0,1
	1N HCl	7,1	3,6	3,7	4,7	2,7	< 0,1
Глеезём криотурбированный (кустарничково-лишайниковое сообщество) Histic Cryosols (dwarf shrub-lichen-mossy plant community)							
Ghi, 5–19	Валовое / Total	39	29	10,7	15	13	0,32
	ААБ / ААБ	6,9	1,5	0,56	0,72	0,50	< 0,1
	1N HCl	5,8	4,8	3,2	4,3	3,3	< 0,1
G@, 19–49	Валовое / Total	41	27	11,5	15	11	0,27
	ААБ / ААБ	< 2,5	2,0	0,74	1,1	0,34	< 0,1
	1N HCl	7,0	4,3	3,7	4,2	2,2	< 0,1
Среднемировое [12] Worldwide average [12]	Валовое / Total	50	40	20	10	10	0,5
Кларки элементов Clarks of elements	Валовое / Total	83	58	47	16	18	0,13

циент накопления (КН) – соотношение между содержанием элемента в растениях и почве. С учётом разной стратегии поглощения элементов споровыми и сосудистыми растениями этот показатель в отношении мхов и лишайников является условным. Не имея корневой системы, они поглощают воду с растворёнными в ней минеральными веществами всей поверхностью, используя при этом элементы, как из подстилающего субстрата, так и из атмосферных осадков [11]. По КН элементы во мхах образуют следующий ряд: $Zn > Cd > Cu > Ni > Pb > Co$, в лишайниках – $Cd > Zn > Cu > Ni > Pb > Co$. Содержание цинка в вегетирующей части мхов превышает его количество в почве в 1,44, кадмия – в 1,34 раза, что свидетельствует о преобладающем атмосферном поступлении этих элементов.

Заключение

Тяжёлые металлы по запасам в мортмассе тундровых фитоценозов представлены рядом: $Zn > Ni > Cu > Pb > Co > Cd$, в живых растениях: $Zn > Cu > Ni > Pb > Co > Cd$. Доминирование мхов способствует замедленному кругообороту элементов и длительной консервации их в органогенных горизонтах, выступающих в качестве почвенно-геохимического барьера с замедленным круговоротом элементов. Ранжирование ТМ в почвах под различными растительными сообществами в основном совпадает с их распределением в доминантных видах растений. В минеральной толще почв, также как и в преобладающих растениях, отмечено наиболее высокое содержание цинка, наименьшее – кадмия. Кумулятивная способность споровых растений может быть использована для экологической экспертизы при оценке загрязнения ландшафтов арктической зоны ТМ и проведения мониторинга.

Исследования выполнены в рамках темы государственного задания ИБ Коми НЦ УрО РАН «Выявление общих закономерностей формирования и функционирования торфяных почв на территории Арктического и Субарктического секторов Европейского Северо-Востока России (Гр.: АААА-А17-117122290011-5)».

Литература

1. Перельман А.И., Касимов Н.С. Геохимия ландшафта. М.: Астрея, 2000, 1999. 768 с.
2. Oberman N.G., Mazhitova G.G. Permafrost mapping of Northeast European Russia based on the period

of climatic warming 1970–1995 // Norsk Geografisk Tidsskrift. Norwegian Journal of Geography. 2003. V. 57. No. 2. P. 111–120.

3. Patova E.N., Kulyugina E.E., Deneva S.V. Processes of natural soil and vegetation recovery on a worked-out open pit coal mine (Bol'shezemel'skaya tundra) // Russian Journal of Ecology. 2016. V. 47. No. 3. P. 228–233.

4. Хабибуллина Ф.М., Кузнецова Е.Г., Панюков А.Н. Трансформация растительности, почв и почвенной микробиоты в зоне воздействия породных отвалов угольной шахты «Воркутинская» // Теоретическая и прикладная экология. 2015. № 4. С. 30–37.

5. Родин Л.Е., Ремезов Н.П., Базилевич Н.И. Методические указания к изучению динамики и биологического круговорота в фитоценозах. Л.: Наука, 1967. 143 с.

6. Полевой определитель почв России. М.: Почвенный институт им. В.В. Докучаева, 2008. 182 с.

7. IUSS Working Group WRB World reference base for soil resources 2014. International soil classification system for naming soils and creating legends for soil maps. World Soil Resources Reports No. 106. FAO, Rome, 2014. 181 p.

8. Родин Л.Е., Базилевич Н.И. Динамика органического вещества и биологический круговорот зольных элементов и азота в основных типах растительности земного шара. М.-Л.: Наука, 1965. 254 с.

9. Обзор фонового состояния окружающей природной среды в СССР за 1985 год / Под ред. В.Н. Силкина. Обнинск: Московское отделение Гидрометеоназдата, 1986. 201 с.

10. Чертко Н.К., Чертко Э.Н. Геохимия и экология химических элементов: Справочное пособие. Мн.: Издательский центр БГУ, 2008. 140 с.

11. Bargagli R. Trace elements in terrestrial plants: an ecophysiological approach to biomonitoring and biorecovery. Imprint: Berlin; New York: Springer, 1998. 324 p.

References

1. Perelman A.I., Kasimov N.S. Landscape geochemistry. Moskva: Astreya, 2000, 1999. 768 p. (in Russian).
2. Oberman N.G., Mazhitova G.G. Permafrost mapping of Northeast European Russia based on the period of climatic warming 1970–1995 // Norsk Geografisk Tidsskrift. Norwegian Journal of Geography. 2003. V. 57. No. 2. P. 111–120. doi: 10.1080/00291950310001513
3. Patova E.N., Kulyugina E.E., Deneva S.V. Processes of natural soil and vegetation recovery on a worked-out open pit coal mine (Bol'shezemel'skaya tundra) // Russian Journal of Ecology. 2016. V. 47. No. 3. P. 228–233. doi: 10.1134/S1067413616020419
4. Khabibullina F.M., Kuznetsova E.G., Panyukov A.N. Transformation of vegetation, soils, and soil microbiota in the impact zone of the coal mine “Vorkutinskaya” // Theoretical and Applied Ecology. 2015. No. 4. P. 30–37 (in Russian). doi: 10.25750/1995-4301-2015-4-030-037
5. Rodin L.E., Remezov N.P., Bazilevich N.I. Recommended study practices on dynamics and biological

turnover in phytocenoses. Leningrad: Nauka, 1967. 143 p. (in Russian).

6. Field guide for Russian soils. Moskva: V.V. Dokuchaev Soil Science Institute, 2008. 182 p. (in Russian).

7. IUSS Working Group WRB World reference base for soil resources 2014. International soil classification system for naming soils and creating legends for soil maps. World Soil Resources Reports No. 106. FAO, Rome, 2014. 181 p.

8. Rodin L.E., Bazilevich N.I. Organic matter dynamics and biological turnover of ash elements and

nitrogen in the main types of the world vegetation. Moskva-Leningrad: Nauka, 1965. 254 p. (in Russian).

9. Summary on background environmental conditions in the USSR for 1985 / V.N. Silkin. Obninsk: Moskovskoe otделение Gidrometeoizdata, 1986. 201 p. (in Russian).

10. Chertko N.K., Chertko E.N. Geochemistry and ecology of chemical elements: Resource Book. Minsk: Izdatelskiy tsentr BGU, 2008. 140 p. (in Russian).

11. Bargagli R. Trace elements in terrestrial plants: an ecophysiological approach to biomonitoring and biorecovery. Imprint: Berlin; New York: Springer, 1998. 324 p.

Влияние морского мусора на местообитания ластоногих в Японском море

© 2019. И. О. Катин¹, к. б. н., научный руководитель лаборатории,
В. А. Нестеренко², д. б. н., профессор, В. А. Дубина^{3,4}, к. г. н., с. н. с.,

¹ННЦ морской биологии ДВО РАН,

690041, Россия, г. Владивосток, ул. Пальчевского, д. 17,

²ФНЦ биоразнообразия наземной биоты Восточной Азии ДВО РАН,

690022, Россия, г. Владивосток, пр-т 100-летия Владивостока, д. 159,

³Тихоокеанский океанологический институт им. В. И. Ильичева ДВО РАН,

690041, Россия, г. Владивосток, ул. Балтийская, д. 43,

⁴Дальневосточный государственный технический

рыбохозяйственный университет,

690087, Россия, г. Владивосток, ул. Луговая, д. 52 б,

e-mail: vanester@mail.ru

В последнее десятилетие в приконтинентальной части Японского моря резко возросла степень антропогенного воздействия на прибрежные экосистемы в целом и местообитания ластоногих в частности. Усиление прессинга обусловлено появлением новых форм морского мусора, связанным с интенсификацией прибрежного рыболовного промысла. Наибольшую опасность рыболовецкий мусор представляет для ларги *Phoca largha*, популяция которой в зал. Петра Великого находится в состоянии неустойчивого равновесия, при котором численность группировки находится на тревожно низком уровне. Процессы репродукции ларги проходят на лежбищах островов залива, система течений в котором способствует аккумуляции мусора в бухтах, используемых тюленями для формирования береговых объединений. Прямые угрозы, связанные с гибелью животных от повреждений морским мусором, и опосредованные угрозы, связанные со снижением площади лежбищ в период родов и выкармливания детёнышей, могут вызвать сдвиг существующего равновесия и привести к снижению численности популяции ларги до критического уровня.

Ключевые слова: антропогенное воздействие, морской мусор, местообитания ластоногих, ларга, Японское море.

The impact of marine debris on pinniped habitats in the Sea of Japan

© 2019. I. O. Katin¹ ORCID: 0000-002-9601-7100, V. A. Nesterenko² ORCID: 0000-0002-3677-8805,

V. A. Dubina^{3,4} ORCID: 0000-0003-3273-8977

¹National Scientific Center of Marine Biology FEB RAS,

17, Palchevskogo St., Vladivostok, Russia, 690041,

²Federal Scientific Center of the East Asia Terrestrial Biodiversity FEB RAS,

159, Prospect 100-letiya Vladivostoka, Vladivostok, Russia, 690022,

³V. I. Il'ichev Pacific Oceanological Institute FEB RAS,

43, Baltiyskaya St., Vladivostok, Russia, 690041,

⁴Far Eastern State Technical Fisheries University,

52b, Lugovaya St., Vladivostok, Russia, 690087,

e-mail: vanester@mail.ru

In the last decade, the degree of anthropogenic impact on the habitats of pinnipeds in the coastal ecosystems of the Sea of Japan has sharply increased. The increase in pressure is caused by the emergence of new forms of marine debris associated with the intensification of coastal fishing. The greatest danger from fishing debris exists for the most numerous species of the region – the spotted seal *Phoca largha*. A unique feature of the territorial grouping of this species in Peter the Great Bay is that seals give birth not on sea ice, but on shore and during the reproductive period, the overwhelming majority of the population concentrates on few dozen square kilometers of water area of the Rimsky-Korsakov Archipelago. A high degree of anthropogenic impact in the bay is compensated by the high survival rate of newborns, and as a result, the largha population is in a state of unstable equilibrium, ensuring the maintenance of the numbers of seals at an alarmingly low level. Whelping occurs in haul out sites located in the pocket-shaped abrasive bays of the small

islands of the archipelago, and the system of currents in the bay contributes to the accumulation of debris in such bays. Peculiarities of transport and circulation of marine debris are considered, as well as threats to seals, both direct ones, connected with the death of animals from damage by nets and other fishing wastes, and indirect ones, associated with a decrease in the area of haulouts during nursing period. Although seal mortality from marine debris is about 2%, but such an increase in the anthropogenic load on the largha population can cause a shift in the steady balance and lead to a decrease in the number of seals to a critical level.

Keywords: anthropogenic impact, marine debris, pinniped habitats, the spotted seal (largha), the Sea of Japan.

Морские млекопитающие чувствительны к любым нарушениям их местообитаний под воздействием антропогенных факторов, и наиболее уязвимой в этом отношении группой, в силу своей амфибионтности, являются ластоногие. Для разных видов тюленей трансформация параметров среды имеет региональные особенности и при выявлении общих закономерностей и экологической значимости какого-либо антропогенного фактора необходимо оценивать степень специфичности его влияния на конкретные популяции, особенно в местах репродуктивной концентрации животных. В Японском море обитает шесть видов ластоногих [1], самым многочисленным из которых является пятнистый тюлень, или ларга (*Phoca largha* Pallas, 1811). В пределах обширного ареала ларги существует восемь репродуктивных концентраций [2] и территориальная группировка этого вида в зал. Петра Великого является одной из самых малочисленных [3]. Уникальность группировки состоит в том, что в отличие от типично пагофильных популяций северной части ареала исторически сложившейся нормой для обитающей здесь ларги является береговое размножение, проходящее на островах, геоморфологическое строение которых благоприятствует успешному проведению родов и выкармливанию детёнышей [4]. В период репродукции и линьки подавляющая часть тюленей концентрируется на архипелаге Римского-Корсакова, где подвергается разнообразным угрозам антропогенного характера. В настоящее время одним из главных факторов по степени влияния на экосистемы является загрязнение, а в зал. Петра Великого ларга обитает в одном из самых загрязнённых районов [5]. Помимо загрязнения воды, обусловленного разливом нефтепродуктов, а также промышленными и бытовыми стоками, в последнее десятилетие настоящим бедствием для ластоногих становится плавающий морской мусор, не только травмирующий животных, но и приводящий к их гибели. Данная статья посвящена анализу угроз популяции ларги, связанных с усилением антропогенной нагрузки, обусловленной ростом уровня загрязнения мусором, закономерностям

переноса морского мусора по акватории зал. Петра Великого и аккумуляции его в зоне репродукции тюленей.

Материалы и методы

Наблюдения за ларгой и её местообитаниями в зал. Петра Великого (рис. 1) ведутся с 1981 г. С 1997 по 2013 гг. проводились круглогодичные стационарные исследования на о-вах архипелага Римского-Корсакова. При сборе материала использовались два основных подхода [6]: маршрутный учёт с лодки, дающий возможность за короткий промежуток времени обследовать большое количество лежбищ, и скрытое (с использованием длиннофокусной оптики) наблюдение с берега, позволяющее определить закономерности размещения животных, особенности их поведения, долю травмированных особей и другие характеристики, доступные для получения только при отсутствии беспокойства животных. Продолжительность прямых береговых наблюдений за тюленями составила более 10 тыс. часов.

В настоящее время в заливе зарегистрировано 37 лежбищ и более 40 береговых участков, используемых тюленями в период миграционных и трофических перемещений [6]. Обязательным условием программы мониторинга состояния популяции ларги является оценка состояния используемого тюленями берега, включая степень антропогенной нагрузки. На берегах с отложениями мусора ведётся картирование занятых им площадей, оценивается его объём и устанавливается происхождение.

На протяжении всего периода сбора материала систематизировалась информация о травмированных тюленях и случаях их гибели. Из-за отсутствия официальной статистики по прибрежному рыболовству и данных о браконьерстве в Японском море, основным способом получения информации по выявлению, например, уровня смертности ларги в орудиях лова, был опрос местного населения, включая специалистов государственных служб и природоохранных организаций, членов рыболовецких бригад [6].

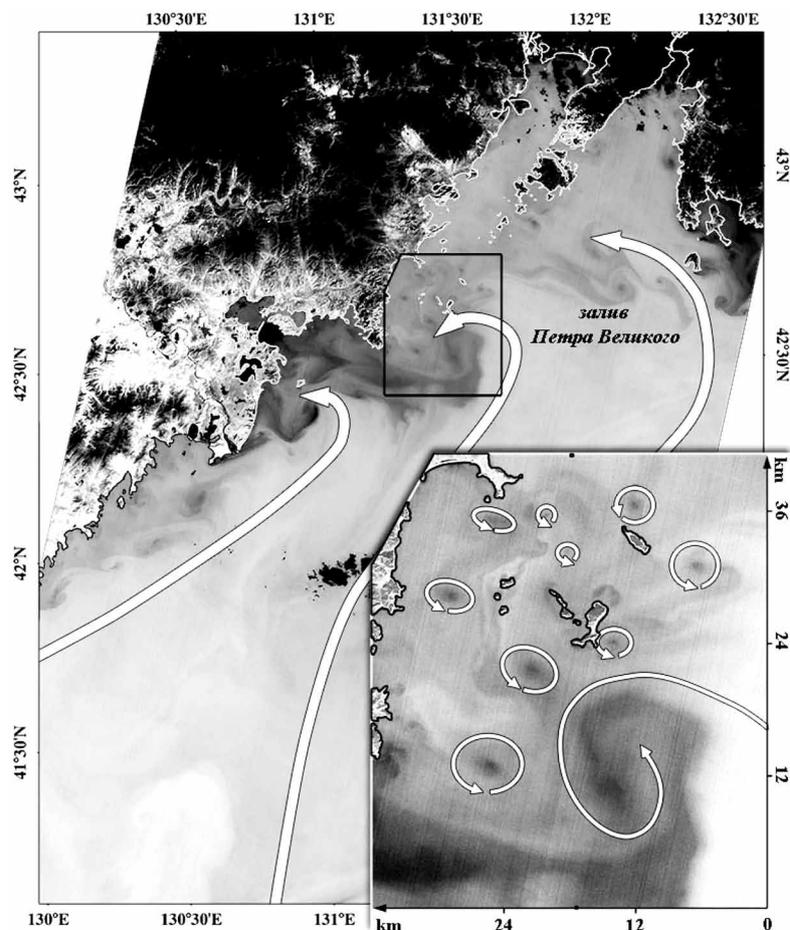


Рис. 1. Изображение зал. Петра Великого, полученное со спутника Landsat-8 в тепловом инфракрасном диапазоне: стрелками показаны направления поверхностных течений; на врезке – арх. Римского-Корсакова и мезомасштабные циклонические вихри
Fig. 1. Thermal infrared image of Peter the Great Bay acquired from Landsat-8: the arrows show directions of the surface currents, inset shows Rimsky-Korsakov Archipelago with submesoscale cyclonic eddies around islands

Океанографические заключения, представленные в настоящей публикации, основываются на оперативном и ретроспективном анализе спутниковой информации высокого и среднего пространственного разрешения (15–250 м), полученной в 1984–2017 гг. с различных космических аппаратов. Анализ спутниковых изображений зал. Петра Великого проводился совместно со всей доступной гидрометеорологической информацией. В 2004–2012 гг. со спутниковыми измерениями синхронизировались визуальные и инструментальные наблюдения на островах архипелага Римского-Корсакова. Целью этих исследований было выявление пространственно-временной изменчивости абиотических факторов в прибрежных экосистемах залива, а также определение источников, масштабов и путей перемещения нефтяного загрязнения и мусора [7, 8].

Результаты и обсуждение

Численность ларги составляет по разным оценкам от 290 до 450 тыс. особей [1, 9]. Так называемый Южный популяционный сегмент [3], объединяющий генетически близкие [10] территориальные группировки ларги Японского и Жёлтого морей, насчитывает не более 5 тыс. особей, из которых численность первой составляет около 3 тыс. особей. Значительные экологические отличия ларги в зал. Петра Великого признавались большинством исследователей [11–13], но лишь исследования последних лет [6] позволили показать уникальность данной группировки: это репродуктивно изолированная социальная форма, отличительной особенностью которой является береговая репродукция.

На протяжении последних 20 лет численность ларги в Японском море остаётся пример-

но на одном уровне в 2,5–3,0 тыс. особей, что позволяет предположить, что популяция находится в состоянии равновесия, прежде всего обусловленного тем, что популяционные потери компенсируются характерной для берегового размножения повышенной выживаемостью новорожденных. Береговое размножение ларги на островном архипелаге, несомненно, предоставляет ряд преимуществ по сравнению с репродукцией на льдах [4, 6], но имеется и обратная сторона: из-за максимально высокой концентрации животных на ограниченной несколькими десятками квадратных километров акватории любое по происхождению и силе воздействие испытывает сразу вся популяция. В случае появления новых или увеличения уровня известных негативных воздействий, равновесие будет нарушено, и последствия этого будут необратимыми.

Наиболее благоприятным фактором поддержания численности группировки ларги на стабильном уровне является то, что последние 40 лет репродуктивное ядро популяции на архипелаге Римского-Корсакова находится под охраной Дальневосточного морского заповедника, где исключена деятельность, ведущая к трансформации среды, невозможны добыча животных и вторжения на лежбища, обеспечивается низкий уровень беспокойства. Однако антропогенное давление на популяцию ларги в зал. Петра Великого продолжает увеличиваться. Одним из показателей этого является появление новых источников загрязнения среды, к которым относится масштабное увеличение плавучего антропогенного морского мусора.

Основным видом мусорного загрязнения, которое приводит к ухудшению качества среды и оказывает влияние на обитающих в ней организмах, является пластик [14], существенную долю которого составляют отходы промысла водных биоресурсов. Ежегодно в Мировом океане теряется 6,4 млн тонн орудий лова [15] и потерянные или выброшенные сети составляют до 46% дрейфующего мусора [16]. Именно фрагменты рыболовных сетей, известные как *ghostnets*, вызывают особую озабоченность: во всем мире они оказывают отрицательное воздействие на морские экосистемы и угрожают фауне [17–19]. Непременную часть плавучего рыболовецкого мусора составляют поплавки, которые транспортируются поверхностными течениями и ветрами [20] и аккумулируются на побережьях бухт [21, 22].

В приконтинентальной части Японского моря рассматриваемый вид загрязнения в последние 10–15 лет становится настоящим

бедствием. Так, основное содержание плавучего мусора в Дальневосточном морском заповеднике приходится именно на рыболовецкий мусор, главным образом поплавки и обрывки снастей, включая как сами сети, так и синтетические тросы от них. Встречается большое количество поплавков как промышленного, так и явно кустарного производства, которые изготовлены из пенополистерола и имеют характерную форму в виде сектора цилиндра.

Граждане КНДР на деревянных судах не более 10–12 м осуществляют промысел на границе с РФ и регулярно заходят в российские территориальные воды, в том числе в пределы Морского заповедника (рис. 2). В территориальных водах КНДР в северо-западной части Японского моря на спутниковых изображениях наблюдается большое количество судов, иногда превышающее 1000 единиц на 10000 км², а плотность составляет от 1 судна на квадратную милю в мористой части до 10 в акватории, примыкающей к устью р. Туманная.

Используемые северокорейскими рыбаками жаберные сети с ячейей 20–40 мм и высотой 8–12 м, поддерживаемые поплавками на поводках, выставляются в дрейфтерные порядки. Поводки из прочного шнура закрепляются на нижнем подборе и имеют длину меньшую, чем высота сетного полотна. Так формируется каркас, в котором образуются ловчие карманы. С каждого плавсредства может быть установлено более километра сетей, которые, в сущности, являются одноразовыми: выловленные объекты промысла обычно просто вырываются из сети, полотно которой при этом разрушается лишь частично. Использованные орудия лова не утилизируются, а выбрасываются и, сохраняя свою уловистость, дрейфуют на большие расстояния, запутывая не только кальмаров, на ловлю которых они чаще всего настроены, но также рыб, морских птиц и млекопитающих.

Анализ архива спутниковых изображений за последние 33 года и многолетние наземные наблюдения за местами скопления и временем появления плавающего мусора в зал. Петра Великого свидетельствуют о том, что трансграничный перенос в российские воды в северо-западной части Японского моря определяется межгодовой, сезонной и синоптической изменчивостью поверхностной циркуляции и происходит во все сезоны [8, 9]. Северо-восточное течение, доставляющее основную часть морского мусора в зал. Петра Великого, сопровождается образованием мезомасштабных циклонических вихрей, которые обуславливают интенсивное вертикальное

A



B



Рис. 2. Морской мусор в зал. Петра Великого (происхождение и аккумуляция).

A – северокорейское рыболовецкое судно, B – фотосхема бухтового лежбища:

h – условная граница зоны, в пределах которой проходят роды и выкармливание детёнышей тюленей;

f – места аккумуляции морского мусора; стрелка показывает детёныша ларги

Fig. 2. Marine debris in Peter the Great Bay (origin and accumulation). A – North Korean fishing boat,

B – photomap of the abrasive bay with haul out site: h – the notional boundary of the zone within which whelping occurs; f – places of accumulation of debris; arrow shows seal pup

и горизонтальное перемешивание и распределяют мусор по берегам островов. Циклонические вихри с холодными ядрами диаметром от 250 м до 4 км вокруг островов отчётливо видны на рисунке 1.

Со времени образования в зал. Петра Великого 10–12 тыс. лет назад островов [23], они попали под трансформирующее гидродинамическое воздействие. В результате процессов абразии мористая сторона островов оказалась обрушена, а с материковой стороны сформировался аккумулятивный берег,

представляющий собой пляж с подвижной косой. Геоморфологической особенностью таких островов является наличие абразионных карманообразных бухт, которые образуются со стороны основного волнового воздействия и представляют собой ограниченную клифом акваторию с прислонённым пляжем в вершинной части. Именно здесь расположены лежбища, с которыми ассоциированы репродуктивные береговые объединения ларги. Из-за высокой степени укрытости условия в таких бухтах оптимальны для рождения и

выкармливания детёнышей. С другой стороны, из-за специфики гидродинамических процессов карманообразные бухты оказываются естественными ловушками, захватывающими переносимые вдоль береговым потоком дрейфующие предметы, которые могут накапливаться на пляже в течение многих лет.

Очевидно, что наибольшую опасность для морских животных разные виды рыболовецкого мусора представляют, находясь в воде. Будучи выброшенным на берег, он перестаёт напрямую быть опасным для большинства обитателей моря, но не для тюленей.

Наиболее часто приходится наблюдать ситуации, при которых животное попадает в некое подобие ячеи и его тело оказывается плотно обхвачено каким-либо предметом. В подавляющем большинстве случаев это рыболовецкий мусор: обрывки сетей и верёвок, упаковочная лента, синтетические мешки, пластиковые пакеты. Значительно реже нами регистрировались петли из стального троса, проволочные кольца, и даже металлические обручи. При этом «удавки» (рис. 3А, 3В) могут зафиксироваться на разных участках тела, от головы до задних лап. Травмиро-

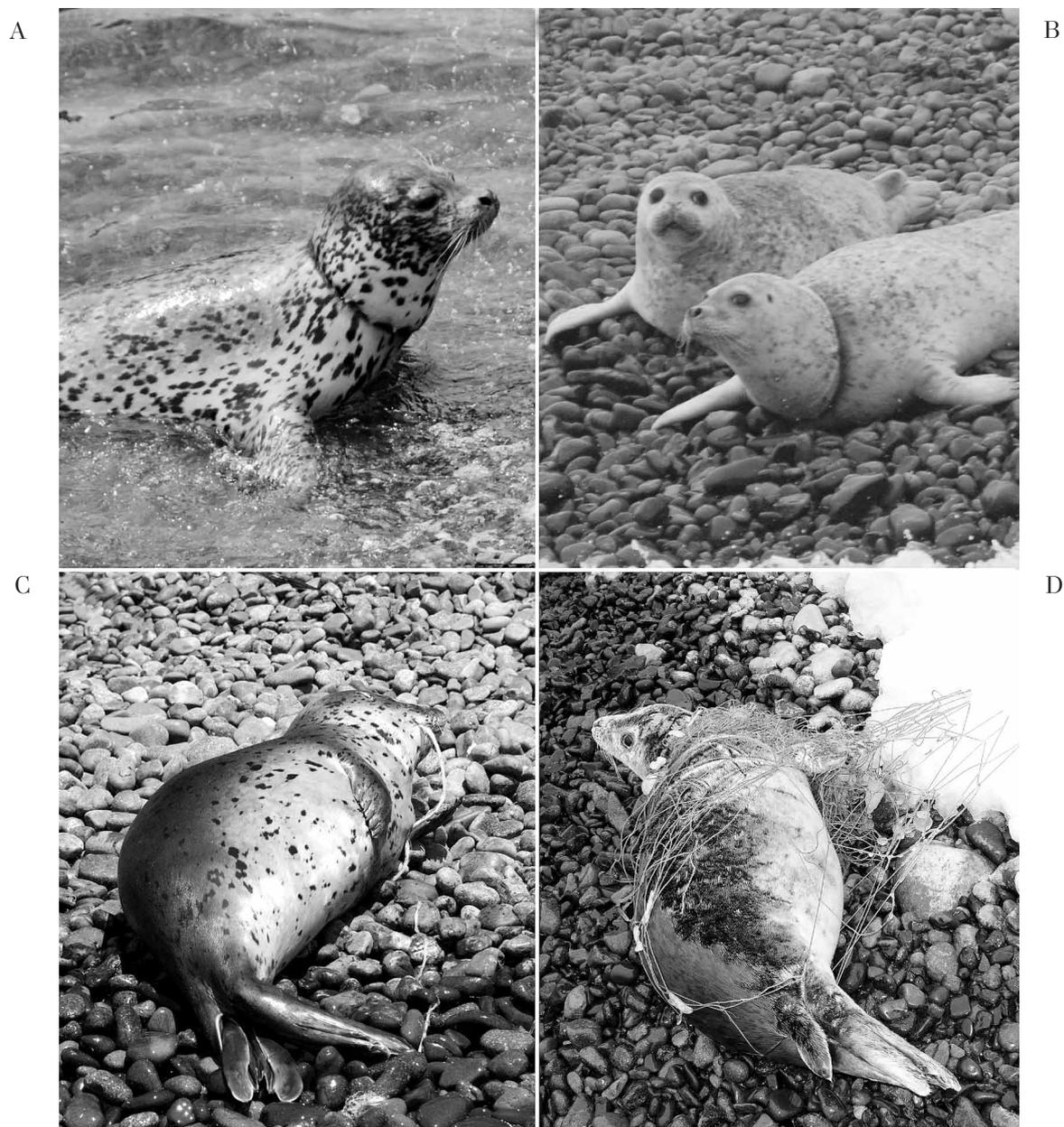


Рис. 3. Примеры травмирования ларги рыболовецким мусором: «удавка» на шее молодой (А) и взрослой (В) особи; тюлень с проглоченным куском жаберной сети (С); животное, запутавшееся в обрывке рыболовной сети (D)

Fig. 3. Examples of seal injuries with fishing debris: “halter” on the neck of a young (A) and an adult (B) individual; seal with a swallowed piece of gill net (C); animal entangled in a scrap of a fishing net (D)

ванные особи оказываются в неравных условиях при выстраивании социальных отношений и им сложнее противостоять хищникам и экстремальным условиям среды.

Наиболее вредоносный мусор, с которым сталкиваются ластоногие – это рыболовные сети. Тюлени подвергаются опасности при контакте с ними как в воде, так и на берегу. Когда кусок сети относительно небольшой, животное может перемещаться с ним продолжительное время. Если тюлень запутается в воде в достаточно большом фрагменте сети и не сможет быстро освободиться, то он непременно утонет. Передвигаясь по берегу, ларга также может запутаться в обрывках сетей и высвободиться у неё, как правило, не получается (рис. 3Д).

Морским мусором травмируется до 7,9% некоторых видов ластоногих и одним из видов негативного его воздействия является проглатывание животными пластика. В последнее время это стало проблемой мирового масштаба. Такая опасность в зал. Петра Великого также существует. Ярким примером может служить случай обнаружения ларги с проглоченной, скрученной в жгут рыболовной сетью; общая длина фрагмента сети составила 2,5 м и большая его часть уже была в желудке (рис. 3С).

Известно, что смертность сеголетков ларги составляет 45–50%, а неполовозрелых старше года – от 8 до 22% [13, 24, 25]. Доля того или иного вида смертности, вызванной как естественными, так и антропогенными причинами, в общем уровне неизвестна. Чтобы хотя бы косвенно оценить вред тюленям от морского мусора, проводятся учёты животных с повреждениями, по которым можно определить происхождение травм. Доля особей с такими травмами разной степени тяжести может составлять 2–3%.

Другой, не столь очевидный, но, тем не менее, достаточно серьёзный вред от аккумулированного на берегу мусора заключается в том, что он откладывается на формируемых прибором пляжных террасах и в понижениях рельефа, как раз на тех участках, где ларги по «биологическим» причинам традиционно предпочитают рожать и выкармливать детёнышей (рис. 2В). На островах зал. Петра Великого ёмкость лежбищ ограничена, и в репродуктивный период они оказываются заполненными семейными группами тюленей. В ситуации, когда мусорными выбросами перекрыта некоторая часть лежбища, происходит уменьшение его используемой площади.

Самки вынуждены искать другое место, которое будет менее удобно для родов. Вероятность успешного выкармливания детёныша и достижения им оптимального состояния перед переходом к самостоятельному образу жизни уменьшается, что в конечном итоге приводит к снижению успеха размножения в популяции.

Заключение

В приконтинентальной части Японского моря обитает несколько видов ластоногих, из которых наиболее массовым видом является ларга. Уникальность одной из самых южных популяций этого вида состоит в том, что размножение и выкармливание детёнышей происходит не на льдах, а на береговых лежбищах островов зал. Петра Великого. Численность этой группировки ларги поддерживается на уровне в 2,5–3 тыс. особей, но установившееся популяционное равновесие обусловлено, во-первых, характерным для берегового размножения высоким уровнем выживания детёнышей, компенсирующего повышенную смертность, вызванную антропогенным прессингом, во-вторых, тем, что зона репродукции ларги расположена на находящемся под охраной Дальневосточного морского заповедника островном архипелаге. Однако в последние годы антропогенная нагрузка на популяцию ларги не только не снижается, но пополняется новыми угрозами, к которым относится резкое увеличение антропогенного мусора, связанного с интенсификацией прибрежного северокорейского рыболовного промысла. Система течений в зал. Петра Великого такова, что морской мусор выносится в его центральную зону и аккумулируется на берегах о-вов архипелага Римского-Корсакова, где сосредоточены все используемые для репродукции лежбища. Прямые угрозы, связанные с гибелью тюленей от повреждений обрывками сетей и другого морского мусора, и опосредованные угрозы, связанные, например, со снижением площади лежбищ в период родов и выкармливания детёнышей, могут вызвать сдвиг установившегося равновесия и привести к снижению численности популяции ларги до критического уровня.

Литература

1. Бурдин А.М., Филатова О.А., Хойт Э. Морские млекопитающие России: справочник-определитель. Киров, 2009. 208 с.

2. Shaughnessy P.D., Fay F.H. A review of the taxonomy and nomenclature of North Pacific harbour seals // J. Zool. 1977. V. 182. P. 385–419.
3. Boveng P.L., Bengtson J.L., Buckley T.W., Cameron M.F., Dahle S.P., Kelly B.P., Megrey B.A., Overland J.E., Williamson N.J. Status review of the spotted seal (*Phoca largha*). U.S. Dep. Comm. NOAA Tech. Memo. NMFS-AFSC-200, 2009. 146 p.
4. Катин И.О., Нестеренко В.А. Океанологические условия и репродукция пятнистой нерпы (*Phoca largha*) в заливе Петра Великого Японского моря // Океанология. 2010. Т. 50. № 1. С. 82–88.
5. Нестеренко В.А., Катин И.О. Ларга (*Phoca largha*) в заливе Петра Великого. Владивосток: Дальнаука, 2014. 219 с.
6. Nesterenko V.A., Katin I.O. Haulout: scope of the term and procedure for identification // Russian Journal of Ecology. 2009. V. 40. No. 1. P. 48–54.
7. Дубина В.А., Катин И.О. Нефтяное загрязнение Дальневосточного морского заповедника: спутниковые данные и натурные наблюдения // Вестник ДВО РАН. 2012. № 6. С. 94–100.
8. Дубина В.А., Катин И.О. Особенности трансграничного переноса поверхностных вод в северо-западной части Японского моря по многолетним спутниковым наблюдениям // Вестник ДВО РАН. 2018. № 6. С. 13–19
9. Burns J.J., Fay F.H. Comparative biology of Bering Sea harbor seal populations // Proc. Alaskan Sci. Conf. Fairbanks, 1972. P. 48.
10. O’Corry-Crowe G., Lowry L.F., Burkanov V.N., Trukhin A.M., Hansen L., Frost K.J.Z., Sheffield G. The biogeography and population structure of spotted seals (*Phoca largha*) using mitochondrial DNA // 14 Biennial Conference on the Biology of Marine Mammals. Vancouver, 2001. P. 159.
11. Косыгин Г.М., Тихомиров Э.А. Ларга (*Phoca largha* Pallas) залива Петра Великого // Известия ТИНРО. 1970. Т. 70. С. 114–137.
12. Трухин А.М. Ларга. Владивосток: Дальнаука, 2005. 246 с.
13. Волошина И.В. Береговые тюлени Японского моря. Владивосток: Русский остров, 2007. 304 с.
14. Hansen R.A., Gross A. Determination of microplastics in coastal beach sediments along Kattgat Sea, Denmark // Theoretical and Applied Ecology. 2019. No. 2. P. 75–82.
15. Derraik J.G.B. The pollution of the marine environment by plastic debris: a review // Mar. Pollut. Bull. 2002. V. 44. P. 842–852.
16. Wilcox C., Heathcote G., Goldberg J., Gunn R., Peel D., Hardesty B.D. Understanding the sources and effects of abandoned, lost, and discarded fishing gear on marine turtles in northern Australia // Conserv. Biol. 2015. V. 29. No. 1. P. 198–206.
17. Lebreton L., Slat B., Ferrari F., Sainte-Rose B., Aitken J., Marthouse R., Hajbane S., Cunsolo S., Schwarz A., Levivier A., Noble K., Debeljak P., Maral H., Schoeneich-Argent R., Brambini R., Reisser J. Evidence that the great Pacific Garbage patch is rapidly accumulating plastic // Scientific Reports. 2018. V. 8. P. 4666.
18. Humborstad O.B., Likkeborg S., Hareide N.R., Furevik D.M. Catches of Greenland halibut (*R. hippoglossoides*) in deepwater ghost-fishing gillnets on the Norwegian continental slope // Fish. Res. 2003. V. 64. P. 163–170.
19. Arthur C., Sutton-Grier A.E., Murphy P., Bamford H. Out of sight but not out of mind: harmful effects of derelict traps in selected U.S. coastal waters // Mar. Pollut. Bull. 2014. V. 86. P. 19–28.
20. Kako S., Isobe A., Seino S., Kojima A. Inverse estimation of drifting-object outflows using actual observation data // J. Oceanogr. 2010. V. 66. P. 291–297.
21. Kako S., Isobe A., Kataoka T., Hinata H. A decadal prediction of the quantity of plastic marine debris littered on beaches of the East Asian marginal seas // Mar. Pollut. Bull. 2014. V. 81. P. 174–184.
22. Lavers J.L., Bond A.L. Exceptional and rapid accumulation of anthropogenic debris on one of the world’s most remote and pristine islands // PNAS. 2017. V. 114. P. 6052–6055.
23. Велижанин А.Г. Время изоляции материковых островов северной части Тихого океана // Доклады АН СССР. 1976. Т. 231. № 1. С. 205–207.
24. Гольцев В.Н., Федосеев Г.А. Динамика возрастного состава залежек и воспроизводительная способность популяций ларги // Известия ТИНРО. 1970. Т. 71. С. 309–317.
25. Lowry L.F. The spotted seal (*Phoca largha*) // Marine mammals species accounts / Eds. J.J. Burns, K.J. Frost, L.F. Lowry. Juneau, AK: Alaska Department Fish and Game. 1985. P. 89–96.

References

1. Burdin A.M., Filatova J.A., Hoyt E. Marine mammals of Russia: a guidebook. Kirov, 2009. 208 p. (in Russian).
2. Shaughnessy P.D., Fay F.H. A review of the taxonomy and nomenclature of North Pacific harbour seals // J. Zool. 1977. V. 182. P. 385–419. doi: 10.1111/j.1469-7998.1977.tb03917.x
3. Boveng P.L., Bengtson J.L., Buckley T.W., Cameron M.F., Dahle S.P., Kelly B.P., Megrey B.A., Overland J.E., Williamson N.J. Status review of the spotted seal (*Phoca largha*). U.S. Dep. Comm. NOAA Tech. Memo. NMFS-AFSC-200, 2009. 146 p.
4. Katin I.O., Nesterenko V.A. Oceanological conditions and reproduction of the spotted seal (*Phoca largha*) in Peter the Great Bay of the Sea of Japan // Oceanology. 2010. V. 50. P. 77–82.
5. Nesterenko V.A., Katin I.O. The spotted seal (*Phoca largha*) in Peter the Great Bay. Vladivostok: Dalnauka, 2014. 219 p. (in Russian).

- 6 Nesterenko V.A., Katin I.O. Haulout: scope of the term and procedure for identification // Russian Journal of Ecology. 2009. V. 40. No. 1. P. 48–54.
7. Dubina V.A., Katin I.O. Oil pollution of the Far eastern marine reserve: satellite data and field studies // Vestnik DVO RAN. 2012. No. 6. P. 94–100 (in Russian).
8. Dubina V.A., Katin I.O. Oil pollution of the Far eastern marine reserve: satellite data and field studies // Vestnik DVO RAN. 2018. No. 6. P. 13–19 (in Russian).
9. Burns J.J., Fay F.H. Comparative biology of Bering Sea harbor seal populations // Proc. Alaskan Sci. Conf. Fairbanks, 1972. P. 48.
10. O'Corry-Crowe G., Lowry L.F., Burkanov V.N., Trukhin A.M., Hansen L., Frost K.J., Sheffield G. The biogeography and population structure of spotted seals (*Phoca largha*) using mitochondrial DNA // 14 Biennial Conference on the Biology of Marine Mammals. Vancouver, 2001. P. 159.
11. Kosygin G.M., Tikhomirov E.A. Larga (*Phoca largha* Pallas) of Peter the Great Bay // Izvestiya TINRO. 1970. V. 70. P. 114–137 (in Russian).
12. Trukhin A.M. Larga. Vladivostok: Dalnauka, 2005. 246 p. (in Russian).
13. Voloshina I.V. Coastal seals of the Sea of Japan. Vladivostok: Russkiy ostrov, 2007. 304 p. (in Russian).
14. Hansen R.A., Gross A. Determination of microplastics in coastal beach sediments along Kattegat Sea, Denmark // Theoretical and Applied Ecology. 2019. No. 2. P. 75–82. doi: 10.25750/1995-4301-2019-2-075-082
15. Derraik J.G.B. The pollution of the marine environment by plastic debris: a review // Mar. Pollut. Bull. 2002. V. 44. P. 842–852. doi: 10.1016/S0025-326X(02)00220-5
16. Wilcox C., Heathcote G., Goldberg J., Gunn R., Peel D., Hardesty B.D. Understanding the sources and effects of abandoned, lost, and discarded fishing gear on marine turtles in northern Australia // Conserv. Biol. 2015. V. 29. No. 1. P. 198–206. doi: 10.1007/s10872-010-0025-9
17. Lebreton L., Slat B., Ferrari F., Sainte-Rose B., Aitken J., Marthouse R., Hajbane S., Cunsolo S., Schwarz A., Levivier A., Noble K., Debeljak P., Maral H., Schoeneich-Argent R., Brambini R., Reisser J. Evidence that the great Pacific Garbage patch is rapidly accumulating plastic // Scientific Reports. 2018. V. 8. P. 4666. doi: 10.1038/s41598-018-22939-w
18. Humborstad O.B., Likkeborg S., Hareide N.R., Furevik D.M. Catches of Greenland halibut (*R. hippoglossoides*) in deepwater ghost-fishing gillnets on the Norwegian continental slope // Fish. Res. 2003. V. 64. P. 163–170.
19. Arthur C., Sutton-Grier A.E., Murphy P., Bamford H. Out of sight but not out of mind: harmful effects of derelict traps in selected U.S. coastal waters // Mar. Pollut. Bull. 2014. V. 86. P. 19–28. doi: 10.1016/j.marpolbul.2014.06.050
20. Kako S., Isobe A., Seino S., Kojima A. Inverse estimation of drifting-object outflows using actual observation data // J. Oceanogr. 2010. V. 66. P. 291–297. doi: 10.1007/s10872-010-0025-9
21. Kako S., Isobe A., Kataoka T., Hinata H. A decadal prediction of the quantity of plastic marine debris littered on beaches of the East Asian marginal seas // Mar. Pollut. Bull. 2014. V. 81. P. 174–184. doi: 10.1016/j.marpolbul.2014.01.057
22. Lavers J.L., Bond A.L. Exceptional and rapid accumulation of anthropogenic debris on one of the world's most remote and pristine islands // PNAS. 2017. V. 114. P. 6052–6055. doi: 10.1073/pnas.1619818114
23. Velizhanin A.G. Time of Isolation of the Mainland Islands in the Northern Part of the Pacific Ocean // Doklady akademii nauk SSSR. 1976. V. 231. No. 1. P. 205–207 (in Russian).
24. Goltsev V.N., Fedoseev G.A. Dynamics of the age composition of rookeries and the replacement capacity of harbor seal populations // Izvestiya TINRO. 1970. V. 71. P. 309–317 (in Russian).
25. Lowry L.F. The spotted seal (*Phoca largha*) // Marine mammals species accounts / Eds. J.J. Burns, K.J. Frost, L.F. Lowry. Juneau, AK: Alaska Department Fish and Game, 1985. P. 89–96.

Комплексный подход в оценке экологического состояния городских почв

© 2019. С. Г. Скугорева^{1,2}, к. б. н., н. с., Т. И. Кутявина¹, к. б. н., с. н. с., С. Ю. Огородникова², к. б. н., с. н. с., Л. В. Кондакова^{1,2}, д. б. н., профессор, В. С. Симакова^{1,3}, аспирант, А. Л. Блинова³, магистрант, Ю. Н. Зыкова³, к. б. н., доцент, Л. И. Домрачева^{2,3}, д. б. н., профессор, Т. Я. Ашихмина^{1,2}, д. т. н., профессор, г. н. с., зав. лабораторией,

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

²Институт биологии Коми НЦ УрО РАН, 167982, Россия, Республика Коми, г. Сыктывкар, ул. Коммунистическая, д. 28,

³Вятская государственная сельскохозяйственная академия, 610017, Россия, г. Киров, Октябрьский проспект, д. 133,

e-mail: dli-alga@mail.ru

Впервые проведена оценка состояния городских почв вблизи одной из автомоек г. Кирова с использованием различных методов физико-химического, микробиологического анализа и фитотестирования. Полученные данные свидетельствуют о высоком уровне загрязнения почв нефтепродуктами, содержание которых превысило условно фоновое значение в 27–173 раза. Токсический эффект исследуемых урбанозёмов проявился в снижении каталазной активности, видового разнообразия фототрофов, диаметра колоний азотобактера, увеличении фитотоксичности по отношению к растениям ячменя и резком снижении численности живых клеток в популяции цианобактерии *Nostoc paludosum*. Между данными показателями и содержанием нефтепродуктов в пробах почв существует достаточно высокая обратная корреляционная связь ($r = -0,67 - -0,92$). В исследуемых пробах зафиксирован эффект цианофитизации фототрофных популяций, параллельно с увеличением содержания нефтепродуктов эффект усиливался ($r = 0,79$). Таким образом, результаты комплексного химико-биологического обследования показывают высокий уровень стрессовых воздействий на изучаемые индикаторные функции и тест-организмы, который постепенно снижался по мере удаления исследуемых участков от автомойки. Сравнительный анализ используемых физико-химических и биологических методов показал, что для определения степени загрязнения городских почв можно использовать три критерия: каталазную активность почвы, цианобактериальное биотестирование почвенной вытяжки и определение индекса роста высшего растения.

Ключевые слова: городские почвы, нефтепродукты, каталазная активность, биоиндикация, фитотестирование, цианобактериальное тестирование.

Integrated approach to environmental assessment of urban soil

© 2019. S. G. Skugoreva^{1,2} ORCID: 0000-0002-5902-5187[?]

T. I. Kutyavina¹ ORCID: 0000-0001-7957-0636[?], S. Yu. Ogorodnikova² ORCID: 0000-0001-8865-4743[?]

L. V. Kondakova^{1,2} ORCID: 0000-0002-2190-686X[?], V. S. Simakova^{1,3} ORCID: 0000-0003-0250-1936[?]

A. L. Blinova³ ORCID: 0000-0002-8912-1081[?], Yu. N. Zyкова³ ORCID: 0000-0003-0711-250X[?]

L. I. Domracheva^{2,3} ORCID: 0000-0002-7104-3337[?]

T. Ya. Ashikhmina^{1,2} ORCID: 0000-0003-4919-0047[?]

¹Vyatka State University,

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

²Institute of Biology of the Komi Science Centre of the Ural Branch of RAS,

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

³Vyatka State Agricultural Academy,

133, Oktyabrskiy Prospect, Kirov, Russia, 610017,

e-mail: dli-alga@mail.ru

For the first time, an assessment of the state of urban soils near one of the car washes in Kirov was made using various methods of physicochemical, microbiological analysis and phytotesting. The data obtained indicate a high level of soil contamination with oil products, the content of which exceeded the conditionally background value by 27–173 times. The toxic effect of the studied urbanozems was manifested in a decrease in catalase activity, species diversity of phototrophs, the diameter of the colonies of the azotobacter, an increase in phytotoxicity to barley plants, and a sharp decrease in the number of living cells in the *Nostoc paludosum* cyanobacteria population. There is a rather high inverse correlation relationship ($r = -0.67$ – -0.92) between these indicators and the content of oil products in soil samples. In the samples under study, the effect of cyanophytization of phototrophic populations was recorded; in parallel with an increase in the content of oil products, the effect intensified ($r = 0.79$). Thus, the results of a comprehensive chemical and biological examination show a high level of stressful effects on the studied indicator functions and test organisms, which gradually decreased as the studied areas moved away from the car wash. A comparative analysis of the physicochemical and biological methods used showed that three criteria can be used to determine the degree of contamination of urban soils: catalase activity of the soil, cyanobacterial bioassay of soil extract and determination of the growth index of higher plants.

Keywords: urban soils, oil products, catalase activity, bioindication, phytotesting, cyanobacterial testing.

В последние годы в связи с ростом количества автомобильного транспорта существенно пополнился список поллютантов, загрязняющих городские почвы [1]. В частности, на автомойках широко используются автомобильные шампуни, относящиеся к синтетическим поверхностно-активным веществам (СПАВ), отрицательное действие которых на живые организмы неоднократно отмечалось [2].

Поверхностно-активные вещества выбрасываются в различные элементы окружающей среды (ОС) (атмосферу, воду и почву), где они могут подвергаться многочисленным физико-химическим процессам (сорбции, деградации) и свободно мигрировать [3, 4]. Кроме того, СПАВ, присутствующие в ОС, накапливаются в живых организмах, что может отрицательно влиять на биологические компоненты экосистем [5–7].

Известно, что микроорганизмы (МО) способны участвовать в разложении СПАВ. Например, выделено 2 штамма бактерий рода *Pseudomonas* – С12 и С12В, которые активно разрушали анионные ПАВ [8]. Методом накопления получен один штамм *Ps. fluorescens* и два штамма *Nocardia* sp., способные использовать в качестве единственного источника углерода анионные ПАВ.

Цель данной работы – оценить состояние почвы вблизи городской автомойки с использованием физико-химических и биологических методов; сравнить чувствительность использованных методов для оценки экологического состояния обследованных почв.

Объекты и методы исследования

Образцы почв отбирали осенью 2018 г. с глубины 0–10 см в одном из окраинных районов г. Кирова на трёх участках, расположенных на расстоянии 3, 6 и 9 м от автомойки, куда попадают стоки, в которых могут содер-

жаться автошампуни и бензин. По гранулометрическому составу изученные пробы почв в основном песчаные и супесчаные. В качестве условного фона использовали образцы дерново-подзолистой почвы, не подверженной техногенному воздействию.

Химические методы исследования. Определение массовой концентрации ионов в водных вытяжках из почвы (соотношение почва : вода равно 1 : 2,5) проводили методом ионной хроматографии на хроматографе «Стайер» по ФР.1.31.2008.01724 и ФР.1.31.2008.01738, водородный показатель водной ($pH_{\text{водн}}$) и солевой ($pH_{\text{КCl}}$) вытяжек измеряли на рН-метре-иономере «Эксперт-001», электропроводность – на кондуктометре «Cond 340i» по РД 52.24.495-2005, содержание органического вещества – фотометрически по методу Тюрина в модификации ЦИНАО на спектрофотометре «UNICO 2800» по ГОСТ 26213-94, нефтепродуктов – флуориметрически анализаторе «Флюорат-02» по ПНД Ф 16.1:2.21-98. Активность почвенной каталазы определяли газометрическим методом, основанном на измерении объёма кислорода, который выделяется при взаимодействии почвы с пероксидом водорода [9].

Методы биоиндикации и биотестирования

Альгоиндикация. Навеску исследуемой почвы массой 60 г помещали в стерильные чашки Петри и увлажняли до 60% от полной влагоёмкости (ПВ). На выровненную поверхность раскладывали покровные стёкла (стёкла обрастания). Далее чашки Петри со стёклами обрастания оставляли на 30 суток при естественном освещении. После истечения времени экспозиции во всех вариантах методом микроскопирования определяли видовой состав водорослей и цианобактерий (ЦБ).

Индикация состояния почвы с помощью азотобактера. Комочки исследуемой почвы раскладывали на агаризованной среде Эшби, наблюдая в дальнейшем за степенью обраста-

ния их бактериями р. *Azotobacter*, меланизации и за размером бактериальных колоний [10, 11].

Фитотестирование. В качестве тест-организма использовали семена ярового ячменя (*Hordeum vulgare* L.) сорта Изумруд, который характеризуется быстрым ростом и развитием. Образцы почвы массой 35 г помещали в стерильные чашки Петри, раскладывая на увлажнённой и выровненной поверхности почвы по 10 семян. Повторность опыта пятикратная. Экспозиция опыта составляла 7 суток при $t = +22-24$ °С. Перед закладкой опыта проводили калибровку семян: убирали семена с повреждениями, сколами, плесенью и недозревшие. Во всех вариантах в течение срока экспозиции влажность почвы поддерживали на уровне 60% от ПВ. При снятии опыта определяли следующие параметры: всхожесть семян (на 7-е сутки), морфометрические параметры проростков ячменя – длину корня и побега по ГОСТ 12038-84 и ФР.1.39.2006.02264. Кроме того, определяли индекс роста I по формуле [12]:

$$I = (R + P) \cdot D,$$

где R и P – суммарные значения длин корней и проростков, см; D – доля проросших семян.

Цианобактериальное тестирование проводили с использованием ЦБ *Nostoc paludosum* тетразолю-топографическим методом, основанном на определении дегидрогеназной активности по образованию в живых клетках кристаллов 2,3,5-трифенилформазана яркомалинового цвета из бесцветного 2,3,5-трифенилтетразолий хлорида [13].

Математическую обработку полученных данных осуществляли с использованием стандартных методов в программном пакете Microsoft Office Excel.

Результаты и обсуждение

Для изученных образцов почв отмечена слабощелочная реакция среды (табл. 1), что

характерно для городских почв в целом [14]. Для сравнения, pH_{KCl} дерново-подзолистых почв Кировской области составляет в среднем 4,8 [15], а ненарушенных дерново-карбонатных почв г. Кирова – 6,0–7,2 ед. pH [16]. При удалении от автомойки степень кислотности исследуемых почв различается незначительно. Содержание органического вещества в почвах, отобранных на расстоянии 3 и 9 м от автомойки, соответствует значениям, отмеченным ранее для селитебной зоны г. Кирова [17], а в пробе, отобранной на расстоянии 6 м от автомойки, близко к значениям, характерным для зональных почв [16].

Так как для городских почв характерен промывной тип водного режима, зимнее промерзание, поступление солей, применяемых для обработки автодорожных покрытий, почвы по своим свойствам становятся близки к засоленным. Важной характеристикой таких почв является ионный состав водных вытяжек. Данные по электропроводности и содержанию неорганических ионов в водных вытяжках из исследуемых почв представлены в таблице 2. По результатам хроматографического анализа наиболее обеспеченной элементами питания является почва фоновой участка. В вытяжке из этой почвы определены максимальные значения электропроводности, содержания ионов аммония, калия, магния, кальция, фосфат-ионов. Вытяжки из почвы участков, находящихся в 3 и 6 м от автомойки, очень близки по ионному составу. Почва участка, самого удалённого от автомойки, имеет более высокие значения содержания неорганических ионов, в ней преобладают ионы натрия, кальция, хлорид- и сульфат-ионы, что может быть связано с поступлением солей, используемых для обработки дорог от наледи.

Для оценки загрязнения почв нефтепродуктами (НП) использовали их условно фоновое содержание (УФС) для районов, ведущих добычу нефти (40 мг/кг) [18], шкалу уровней загрязнения НП [19], а также данные, полученные другими авторами для аналогичных территорий.

Таблица 1 / Table 1
Физико-химические свойства почвы / Physico-chemical properties of the soil

Расстояние от автомойки, м Distance from car wash, m	$pH_{водн.}$, ед. pH pH_{water} , units of pH	pH_{KCl} , ед. pH pH_{KCl} , units of pH	Органическое вещество, % Organic matter, %
3	7,9±0,1	7,6±0,1	9,2±0,9
6	7,9±0,1	7,5±0,1	2,4±0,5
9	7,7±0,1	7,3±0,1	13,0±1,3
Фон / Background	7,8±0,1	7,1±0,1	7,2±0,7

Таблица 2 / Table 2

Ионный состав и электропроводность водных вытяжек из почв
Ionic composition and conductivity of water extracts from soils

Расстояние от автомойки, м Distance from car wash, m	Eh*, мк См/см Eh, μS/cm	Содержание ионов, мг/л / Content of ions, mg/L								
		Na ⁺	NH ₄ ⁺	K ⁺	Mg ²⁺	Ca ²⁺	Cl ⁻	NO ₃ ⁻	PO ₄ ³⁻	SO ₄ ²⁻
3	256	13,4± 2,0	3,23± 0,32	5,1± 0,8	4,1± 0,4	42± 4	4,3± 0,4	0,29± 0,04	< 0,2	19,0± 2,9
6	236	18,7± 2,8	< 0,1	5,7± 0,9	2,48± 0,25	33,9± 3,4	2,49± 0,25	< 0,1	< 0,2	7,3± 1,1
9	325	39±6	< 0,1	9,2± 1,4	3,25± 0,33	38,0± 3,8	13,3± 1,3	0,39± 0,06	3,20± 0,32	10,2± 1,5
Фон Background	384	1,75± 0,26	6,5± 0,6	10,6± 1,6	6,5± 0,7	74± 7	5,4± 0,5	< 0,1	3,61± 0,36	4,3± 0,6

Примечание: Eh – электропроводность, * – погрешность измерения 5%.
Note: Eh is the electrical conductivity, * – the measurement error is 5%.

Таблица 3 / Table 3

Содержание нефтепродуктов в почвах / Content of oil products in soils

Расстояние от автомойки, м Distance from car wash, m	Нефтепродукты, мг/кг Oil products, mg/kg	Кратность превышения УФС, раз The multiplicity of excess UFS, times	Уровень загрязнения нефтепродуктами* The level of oil pollution
3	6900±1700	173	очень высокий / very high
6	1080±270	27	низкий / low
9	2200±500	55	средний / middle
Фон / Background	24±9	0,6	не загрязнена / not polluted

Примечание: УФС – условно фоновое содержание [15]; * – градация согласно [19].
Note: UFS – conditionally background content [15]; * – gradation according to [19].

Согласно полученным результатам, содержание НП в пробах, отобранных у автомойки, превышает УФС в 27–173 раза (табл. 3). Уровень загрязнения НП изменяется от низкого до очень высокого. Максимальное содержание НП, отмеченное в 3 м от автомойки, может быть связано с утечкой НП от автотранспорта. Содержание НП в дерново-подзолистой почве, не подверженной техногенному воздействию («фон» в табл. 3), почти в 2 раза ниже, чем УФС.

В работе [20] отмечено, что содержание НП у автозаправочных станций (АЗС) г. Кирова варьировало от 520 до 4820 мг/кг (определение проводили методом инфракрасной спектрофотометрии), уровень загрязнения НП изменялся от допустимого до высокого. Несмотря на то, что для определения НП у АЗС и автомойки использовали разные методы, результаты получились сопоставимые. В г. Архангельске вблизи автодорожного полотна в разных участках города содержание НП в почве в среднем составляет от 470 до 1300 мг/кг [24]. Авторы отмечают, что на содержание НП влияет множество факторов: транспортная нагрузка территории, гранулометрический со-

став и тип почв, фракционный состав НП, абiotические факторы среды и др.

Активность каталазы в почвах, расположенных на разном расстоянии от автомойки, варьировала от 0,62 до 0,97 мл O₂/(г почвы • мин) (табл. 3). Минимальное значение активности фермента отмечено на участке, который находится вблизи автомойки. По мере удаления от источника загрязнения активность каталазы в почве возрастала. Выявлена тесная обратная корреляция между активностью почвенной каталазы и расстоянием от автомойки (r = -0,917). Низкая активность каталазы служит косвенным доказательством угнетения жизнедеятельности комплекса почвенных МО, которые выделяют пероксид водорода в процессе дыхания и других биохимических процессов.

Результаты биомониторинговых исследований. Результаты альгоиндикации показали, что максимальное видовое обилие характерно для почвы фонового варианта. По мере приближения к автомойке в почве сокращается число обнаруженных видов водорослей и ЦБ (табл. 4). Наиболее чувствительными оказались предста-

Таблица 3 / Table 3

Каталазная активность почв, мл O₂/(г почвы • мин)
Catalase activity of soils, ml O₂/(g soil • min)

Расстояние от автомойки, м Distance from car wash, m	3	6	9	Фон / Background
Активность каталазы Activity of a catalase	0,62±0,03	0,85±0,05	0,95±0,15	0,97±0,15

Таблица 4 / Table 4

Биоиндикация состояния почвы по видовому обилию микрофототрофов
Bioindication of a condition of the soil on specific abundance of microphototrophs

Расстояние от автомойки, м Distance from car wash, m	Суано- bacteria	Отделы водорослей Phylums of algae			Всего видов/ процент от фона / In total species/percent from background	Содержание цианобактерий в фототрофных популяциях, % The content of cyanobacteria in phototrophic populations, %
		Cloro- phyta	Xantho- phyta	Bacilla- riophyta		
3	4	–	1	–	5/29,4	80,0
6	6	–	1	2	9/52,9	66,7
9	6	3	1	3	13/76,5	46,2
Фон Background	6	5	3	3	17/100,0	35,3

Примечание: прочерк обозначает отсутствие представителей данного отдела водорослей.
Note: a dash indicates the absence of representatives of this phylum of algae.

вители зелёных водорослей, которые полностью отсутствуют в почвенных образцах, отобранных на расстоянии 3 и 6 м от автомойки. К видам фототрофов, чье представительство обнаружено во всех исследованных экотопах, относятся *Leptolyngbya angustissima* (W. et G.S. West) Anagn. et Kom., *Nostoc punctiforme* (Kütz.) Hariot (Cyanobacteria) и *Eustigmatos magnus* (B. Petersen) Hibberd (Xanthophyta). При этом, если в фоновом варианте ЦБ составляют чуть больше 35% от общего видового обилия, то на расстоянии 3 м от автомойки этот показатель составляет 80%, а на расстоянии 6 м – 66,7%, т. е. в случае загрязнения почвы СПАВ наблюдается феномен цианофитизации.

Индикация состояния почвы с использованием бактерий р. *Azotobacter* показала, что во всех вариантах наблюдается 100%-ное

обрастание комочков почвы азотобактером (табл. 5). Вероятно, это объясняется тем, что в течение нескольких лет существования автомойки под влиянием попадающих в почву стоков произошла селекция азотобактера на устойчивые формы, обеспечивающая их выживание при пролонгированном действии стресс-факторов.

В то же время, другие показатели, характеризующие состояние популяций азотобактера, отличаются от фоновых. Отмечается преобладание пигментированных форм (до 88% вблизи автомойки против 22% в почве фонового участка). Кроме того, показано, что ореол роста бактерий вокруг комочков почвы достигал максимума в варианте с фоновой почвой и был существенно ниже в зоне влияния автомойки (от 24 до 40%). Причём, между количеством

Таблица 5 / Table 5

Биоиндикация состояния почвы с использованием бактерий р. *Azotobacter*
Bioindication of the soil with use of bacteria of *Azotobacter* genus

Расстояние от автомойки, м Distance from car wash, m	Степень обрастания комочков почвы, % Extent of fouling of lumps of the soil, %	Количество окрашенных колоний, % Quantity of painted colonies, %	Средний диаметр колоний, мм Average diameter colonies, mm
3	100	88	3,6±0,6
6	100	42	3,8±0,9
9	100	88	3,8±0,6
Фон / Background	100	22	5,0±1,0

окрашенных колоний бактерий р. *Azotobacter* и содержанием НП в почве степень корреляции достаточна высока ($r = 0,77$).

При фитотестировании с использованием ячменя было установлено, что наиболее ёмким показателем состояния растений является индекс роста, при вычислении которого учитываются и морфометрические показатели (высота проростков и длина корней), а также процент проросших семян (табл. 6). Величина данного показателя однозначно диагностирует фитотоксичность почвы на участках, расположенных на расстоянии 3 и 6 м от автомойки.

Цианобактериальное биотестирование. Для проведения данной работы использовали почвенную вытяжку, в которую помещали тест-организм ЦБ *Nostoc paludosum*. Определение состояния цианобактериальной популяции после использования в качестве акцептора водорода 2,3,5-трифенилтетразолий хлорида показало, что в опытных образцах происходит резкое снижение количества жизнеспособных клеток (табл. 7).

Результаты комплексного химико-биологического обследования городских почв показывают, что по всем определяемым параметрам наибольший токсикоз почвы характерен для участка, расположенного на расстоянии 3 м от автомойки (табл. 9). При максимальном содержании НП в почве (6900 мг/кг) наблюдаются минимальные показатели каталазной активности, среднего

диаметра колоний азотобактера, количества видов фототрофов, индекса роста ячменя, содержания живых клеток в популяции ЦБ *N. paludosum*, определяемого по накопленному формазану. Расчёт показал достаточно высокую обратную корреляционную связь между данными показателями: r изменяется в пределах от $-0,670$ до $-0,917$, достигая максимума для каталазной активности почвы ($p = 0,042$). По содержанию ЦБ в фототрофных популяциях взаимосвязь с содержанием НП была прямая и достаточно высокая ($r = 0,790$): чем больше НП содержалось в почве, тем выше был вклад ЦБ в состав фототрофных популяций (до 80% на участке в 3 м от автомойки).

В почвенных образцах с участков, удалённых от автомойки на большее расстояние, наблюдается постепенное снижение стрессового воздействия поллютантов на тест-организмы и организмы-индикаторы. При этом наиболее чёткая реакция прослеживается при анализе таких показателей, как индекс роста ячменя, видовое обилие фототрофов и дегидрогеназная активность ЦБ.

Сравнение показателей, полученных с использованием различных методов, показывает, что большинство из них имеет высокую степень отрицательной корреляционной связи с содержанием НП. Однако, из физико-химических методов наиболее чувствительным было определение активности почвенной каталазы, которая является инте-

Таблица 6 / Table 6
Фитотестирование состояния почвы с использованием ячменя сорта Изумруд
Phytotesting of the soil with use of barley of a sort Izumrud

Расстояние от автомойки, м Distance from car wash, m	Всхожесть, % Viability, %	Высота проростка, см Height of a sprout, cm	Длина корней, см Length of roots, cm	Индекс роста Index of growth
3	36,6	5,4±1,1	10,1±3,1	567
6	50,0	5,5±2,8	11,0±4,1	824
9	75,0	10,3±3,2	7,6±3,3	1341
Фон / Background	93,3	9,0±2,2	7,0±2,9	1489

Таблица 7 / Table 7
Биотестирование городских почв с использованием цианобактерии *Nostoc paludosum*
Biotesting of urban soil with use of a cyanobacterium *Nostoc paludosum*

Расстояние от автомойки, м Distance from car wash, m	Клетки цианобактерий, % / Cells of cyanobacteria, %	
	жизнеспособные / viable	нежизнеспособные / unviable
3	44,5	55,5
6	55,3	44,7
9	78,2	29,8
Фон / Background	80,8	19,2

Таблица 8 / Table 8

Результаты комплексной экологической оценки почв вблизи автомойки
Results of complex environmental monitoring of soils near car wash

Расстояние от автомойки, м Distance from car wash, m	Нефтепродукты, мг/кг Oil products, mg/kg	Каталазная активность, мл O ₂ / (г почвы • мин) Catalase activity, ml O ₂ / (g soil • min)	Количество видов фототрофов / процент от фона Quantity of phototrophic species / percent from background	Содержание цианобактерий в фототрофных популяциях, % The content of cyanobacteria in phototrophic populations, %	Индекс роста ячменя Index of growth of barley	Содержание жизнеспособных клеток в популяции <i>N. paludosum</i> , % The content of viable cells in population of <i>N. paludosum</i> , %	Средний диаметр колоний азотобактера, см Average diameter of colonies of an azotobacter, cm
3	6900±1700	0,62±0,03	5/29,4	80,0	566,9	44,5	3,6±0,6
6	1080±270	0,85±0,05	9/52,9	66,7	824,0	55,3	3,8±0,9
9	2200±500	0,95±0,15	13/76,5	46,2	1341,0	78,2	3,8±0,6
Фон Background	24±9	0,97±0,15	17/100,0	35,3	1489,1	80,8	5,0±1,0
r		-0,917	-0,831	0,790	-0,757	-0,743	-0,670
p		0,042	0,085	0,105	0,121	0,129	0,165

Примечание: r – коэффициент корреляции между показателем биотестирования/биоиндикации и содержанием нефтепродуктов в почве, p – уровень значимости.

Note: r is the correlation coefficient between the bioassay/bioindication indicator and the content of oil products in the soil; p – significance level.

гральным показателем дыхательной активности почвы. Применяемые методы биомониторинга высокочувствительны, однако по степени трудоёмкости и квалификации исполнителей наиболее сложным является определение видового состава микрфототрофов. Поэтому для оценки экологического состояния почвы вполне достаточно использование индекса роста высшего растения и определение жизнеспособности ЦБ. Таким образом, для оценки степени загрязнения городских почв можно использовать три критерия: каталазную активность почвы, цианобактериальное биотестирование почвенной вытяжки и определение индекса роста высшего растения.

Заключение

Проведённый химико-биологический анализ городских почв, расположенных в 3, 6 и 9 м от одной из автомоек г. Кирова свидетельствует о высоком уровне загрязнения НП, содержание которых составило 1080–6900 мг/кг, что превысило условно фоновое значение в 27–173 раза. Токсический эффект городских почв проявился при определении таких диагностических параметров как: каталазная активность, видовое разнообразие фототрофов, диаметр колоний азотобактера, фитотоксичность по отношению к растениям ячменя и резкое снижение численности живых кле-

ток в популяции ЦБ *N. paludosum*. Между данными показателями и содержанием НП в почвах существует достаточно высокая обратная корреляционная связь (r от -0,670 до -0,917). В городских почвах проявился эффект цианофитизации фототрофных популяций, причём с увеличением содержания НП эффект усиливался (r = 0,790). Таким образом, результаты комплексной оценки экологического состояния почв показывают высокий уровень стрессовых воздействий на изучаемые индикаторные функции и тест-организмы, который постепенно снижается по мере удаления исследуемых участков от автомойки.

Сравнительный анализ используемых физико-химических и биологических методов показал, что для определения степени загрязнения городских почв можно использовать три критерия: каталазную активность почвы, цианобактериальное биотестирование почвенной вытяжки и определение индекса роста высшего растения.

Работа выполнена в рамках государственного задания Вятского государственного университета по теме «Механизмы адаптации и устойчивости почвенной микробиоты к техногенному загрязнению» № 5.4962.2017/БЧ; государственного задания Института биологии Коми НЦ УрО РАН по теме «Оценка и прогноз отсроченного техногенного воздействия на при-

родные и трансформированные экосистемы подзоны южной тайги» № 0414-2012-0003.

Литература

1. Особенности урбанизации подзоны южной тайги Европейского Северо-Востока / Под ред. Т.Я. Ашихминой, Л.И. Домрачевой. Киров: ВятГГУ, 2012. 282 с.
2. Домрачева Л.И., Симакова В.С. Реакции про- и эукариотных микроорганизмов на действие синтетических поверхностно-активных веществ (обзор) // Теоретическая и прикладная экология. 2018. № 1. С. 5–17.
3. Rao P., He M. Adsorption of anionic and nonionic surfactant mixtures from synthetic detergents on soils // *Chemosphere*. 2006. V. 63 (7). P. 1214–1221.
4. Scott M.J., Jones M.N. The biodegradation of surfactants in the environment (review) // *Biochimica et Biophysica Acta (BBA) – Biomembranes*. 2000. V. 1508. No. 1–2. P. 235–251.
5. Guixiang L., Guihong L., Yongqiang L., Chen Ch., Lin L., Jiao D., Yingchun L., Qiang L., Guoyong D., Jihong Zh. Evaluation of biodegradability and biotoxicity of surfactants in soil // *RSC Adv*. 2017. V. 7. P. 31018–31026.
6. Olkowska E., Ruman M., Polkowska Z. Occurrence of surface active agents in the environment // *J. Anal. Methods Chem*. 2014. Jan 16. P. 769–708.
7. Watanabe M., Ohyanagi H., Saitoh Y. Experimental study on anaphylactic effects by Fluosol-DA // *J. Artif. Organs*. 1988. V. 17. P. 1513–1522.
8. Roberts M.H., Warinner J.E., Tsai C., Wright D., Cronin L.E. Comparison of estuarine species sensitivities to three toxicants // *Arch. Environ. Contam. Toxicol*. 1982. No. 11. P. 681–692.
9. Хазиев Ф.Х. Методы почвенной энзимологии. М.: Наука, 2005. 252 с.
10. Зенова Г.М., Степанова А.Л., Лихачева А.А., Манчурова Н.А. Практикум по биологии почв. М.: Изд-во МГУ, 2002. 120 с.
11. Артамонова В.С., Бортникова С.Б. О развитии *Azotobacter chroococcum* Beijerinck в старовозрастных отвалах антрацита // Теоретическая и прикладная экология. 2018. № 1. С. 60–72.
12. Андреева О.А., Кожевин П.А. Валидность методов фитотестирования при контроле микробных препаратов, полученных на основе естественных микробных сообществ // Биодиганостика и оценка качества природной среды: подходы, методы, критерии и эталоны сравнения в экотоксикологии: Матер. международного симпозиума и молодежной школы. М.: ГЕОС, 2016. С. 317–318.
13. Домрачева Л.И., Кондакова Л.В., Ашихмина Т.Я., Огородникова С.Ю., Олькова А.С., Фокина А.И. Применение тетразольно-топографического метода определения дегидрогеназной активности цианобактерий в загрязнённых средах // Теоретическая и прикладная экология. 2008. № 2. С. 23–28.

14. Герасимова М.И., Строганова М.Н., Можарова Н.В., Прокофьева Т.В. Антропогенные почвы. Генезис, география, рекультивация. Смоленск: Ойкумена, 2003. 268 с.
15. Ефремова В.А., Дабах Е.В., Кондакова Л.В. Химико-биологическая оценка состояния городских почв // Сибирский экологический журнал. 2013. № 5. С. 741–750.
16. Тюлин В.В. Почвы Кировской области. Киров: Волго-Вятское кн. изд-во, 1976. 288 с.
17. Широких И.Г., Соловьева Е.С., Ашихмина Т.Я. Комплексы актиномицетов в почвах промышленной и селитебной зон Кирова // Почвоведение. 2014. № 2. С. 203–209.
18. Мусихина Е.А. Методологический аспект технологии комплексной оценки экологической ёмкости территорий. М.: Академия естествознания, 2009. 137 с.
19. Письмо Минприроды РФ № 04-25 Роскомзема № 61-5678 от 27.12.93 О порядке определения размеров ущерба от загрязнения земель химическими веществами [Электронный ресурс] <http://docs.cntd.ru/document/9033369> (Дата обращения: 07.08.2019).
20. Олькова А.С., Зимонина Н.М., Лялина Е.И., Бобрецова В.Р. Диагностика локального загрязнения урбанозёмов в районах автозаправочных станций // Теоретическая и прикладная экология. 2017. № 1. С. 56–62.
21. Вишнева Ю.С., Попова Л.Ф. Влияние автотранспорта на содержание углеводов нефтепродуктов в почвах селитебного ландшафта г. Архангельска // *Universum: Химия и биология: электрон. научн. журн*. 2016. № 4 (22). [Электронный ресурс] <http://7universum.com/ru/nature/archive/item/3025> (Дата обращения: 09.08.2019).

References

1. Features of an urbanization of a subband of the southern taiga of the European Northeast / Eds. T.Ya. Ashikhmina, L.I. Domracheva. Kirov: VyatGGU, 2012. 282 p. (in Russian).
2. Domracheva L.I., Simakova V.S. Reactions of pro- and eukaryotic microorganisms to the action of synthetic surfactants (review) // *Theoretical and Applied Ecology*. 2018. No. 1. P. 5–17 (in Russian). doi: 10.25750/1995-4301-2018-1-005-017
3. Rao P., He M. Adsorption of anionic and non-ionic surfactant mixtures from synthetic detergents on soils // *Chemosphere*. 2006. V. 63 (7). P. 1214–1221. doi: 10.1016/j.chemosphere.2005.08.067
4. Scott M.J., Jones M.N. The biodegradation of surfactants in the environment (review) // *Biochimica et Biophysica Acta (BBA) – Biomembranes*. 2000. V. 1508. No. 1–2. P. 235–251. doi: 10.1016/S0304-4157(00)00013-7
5. Guixiang L., Guihong L., Yongqiang L., Chen Ch., Lin L., Jiao D., Yingchun L., Qiang L., Guoyong D., Jihong Zh. Evaluation of biodegradability and biotoxicity of surfactants in soil // *RSC Adv*. 2017. V. 7. P. 31018–31026. doi: 10.1039/C7RA02105D

6. Olkowska E., Ruman M., Polkowska Ż. Occurrence of surface active agents in the environment // *J. Anal. Methods Chem.* 2014. Jan 16. P. 769–708. doi: 10.1155/2014/769708
7. Watanabe M., Ohyanagi H., Saitoh Y. Experimental study on anaphylactic effects by Fluosol-DA // *J. Artif. Organs.* 1988. V. 17. P. 1513–1522.
8. Roberts M.H., Warinner J.E., Tsai C., Wright D., Cronin L.E. Comparison of estuarine species sensitivities to three toxicants // *Arch. Environ. Contam. Toxicol.* 1982. No. 11. P. 681–692.
9. Khaziev F.Kh. Methods of soil enzymology. Moskva: Nauka, 2005. 252 p. (in Russian).
10. Zenova G.M., Stepanova A.L., Likhacheva A.A., Manchurova N.A. Workshop on biology of soils. Moskva: MGU, 2002. 120 p. (in Russian).
11. Artamonova V.S., Bortnikova S.B. About the development of *Azotobacter chroococcum* Beiyrinck in old-age dumps of anthracite // *Theoretical and Applied Ecology.* 2018. No. 1. P. 60–72 (in Russian). doi: 10.25750/1995-4301-2018-1-060-072
12. Andreeva O.A., Kozhevnikov P.A. Validity of methods of phytotesting at control of the microbial medicines received on the basis of natural microbial communities // *Biodiagnostics and assessment of quality of the environment: approaches, methods, criteria and standards of comparison in ecotoxicology: Mater. mezhdunarodnogo simpoziuma i molodezhnogo shkoly.* Moskva: GEOS, 2016. P. 317–318 (in Russian).
13. Domracheva L.I., Kondakova L.V., Ashikhmina T.Ya., Ogorodnikova S.Yu., Olkova A.S., Fokina A.I. Application of a tetrazol-topographical method of determination of degidrogenazny activity of cyanobacteria in the polluted environments // *Theoretical and Applied Ecology.* 2008. No. 2. P. 23–28 (in Russian). doi: 10.25750/1995-4301-2008-2-023-028
14. Gerasimova M.I., Stroganova M.N., Mozharova N.V., Prokofeva T.V. Anthropogenic soils. Genesis, geography, reclamation. Smolensk: Oykumena, 2003. 268 p. (in Russian).
15. Efremova V.A., Dabakh E.V., Kondakova L.V. Chemical-biological assessment of urban soils // *Sibirskiy ekologicheskiy zhurnal.* 2013. No. 5. P. 741–750 (in Russian).
16. Tyulin V.V. Soils of the Kirov region. Kirov: Volgo-Vyatskoe kn. izd-vo, 1976. 288 p. (in Russian).
17. Shirokikh I.G., Soloveva E.S., Ashikhmina T.Ya. Complexes of actinomycetes in the soils of the industrial and residential zones of Kirov // *Soil Science.* 2014. No. 2. P. 203–209 (in Russian). doi: 10.7868/S0032180X1300122
18. Musikhina E.A. Methodological aspect of technology integrated assessment of ecological capacity of territories. Moskva: Akademiya Estestvoznaniya, 2009. 137 p. (in Russian).
19. Letter of the Ministry of Environmental Protection and Natural Resources of Russian Federation No. 04–25 and the Committee of the Russian Federation for Land Resources and Land Development No. 61–5678 dated 12/27/93. About the procedure for determining the extent of damage from chemical pollution of land [Internet resource] <http://docs.cntd.ru/document/9033369> (Accessed: 07.08.2019) (in Russian).
20. Olkova A.S., Zimonina N.M., Lyalina E.I., Bobretsova V.R. Diagnosis of local pollution of urban soils in the areas of petrol stations // *Theoretical and Applied Ecology.* 2017. No. 1. P. 56–62 (in Russian). doi: 10.25750/1995-4301-2017-1-056-062
21. Vishnevaya Yu.S., Popova L.F. The influence of vehicles on the hydrocarbon content of oil products in the soils of the residential landscape of the city of Arkhangelsk // *Universum: Khimiya i biologiya : elektron. nauchn. zhurn.* 2016. No. 4 (22). [Internet resource] <http://7universum.com/ru/nature/archive/item/3025> (Accessed: 09.08.2019) (in Russian).

Генетическое разнообразие популяций сосны обыкновенной *Pinus sylvestris* L.

© 2019. М. В. Рябухина¹, к. б. н, с. н. с., Р. Г. Калякина², к. б. н., доцент, З. Н. Рябинина¹, д. б. н., профессор, Р. А. Майский³, к. т. н., доцент,
¹Федеральный научный центр биологических систем и агротехнологий РАН, 460000, Россия, г. Оренбург, ул. 9 января, д. 29,
²Оренбургский государственный аграрный университет, 460000, Россия, г. Оренбург, ул. Челюскинцев, д. 18,
³Уфимский государственный нефтяной технический университет, 450062, Россия, Республика Башкортостан, г. Уфа, ул. Космонавтов, д. 1,
 e-mail: marija-rjabuhina@mail.ru, kalyakina_railya@mail.ru

В данной статье приводятся результаты оценки генетического разнообразия, генетической структуры и дифференциации популяций сосны обыкновенной в условиях Оренбургского Зауралья с использованием межмикросателлитного анализа полиморфизма ДНК (маркеры 14 изоферментных локусов из ферментных систем аспарататаминотрансферазы, глутаматдегидрогеназы, лейцинаминопептидазы, малатдегидрогеназы, формиатдегидрогеназы, супероксиддисмутазы).

В изучаемых популяциях сосны обыкновенной по исследованным молекулярно-генетическим маркерам выявлен 51 аллель, большая часть из которых была общей. Частота встречаемости этих аллелей варьировала значительно и повсеместно: 62,7% аллельных вариантов были редкими или относительно редкими (частота встречаемости менее 5%). На показатель генетического разнообразия сосны обыкновенной оказывают влияние природно-климатические условия и географическая обособленность, следствием чего явилось большее генетическое разнообразие в популяции Карагайского бора.

Изучение подразделённости генетического разнообразия сосны обыкновенной показало высокий уровень популяционного генетического разнообразия и низкую степень дивергенции в изучаемых популяциях: 5,1% приходилось на межпопуляционную составляющую. Определение генетического расстояния Нея показало близкородственность популяций. Данный показатель составил 0,024. Анализ аллельного разнообразия свидетельствует о высокой стабильности и надёжности популяционных систем сосны обыкновенной и её эволюционной перспективности.

Ключевые слова: сосна обыкновенная, генетическое разнообразие, межмикросателлитный анализ полиморфизма ДНК.

Genetic diversity of *Pinus sylvestris* L. pine populations

© 2019. M. V. Ryabukhina¹ ORCID: 0000-0002-8409-6630*,
 R. G. Kalyakina² ORCID: 0000-0001-8892-0669*, Z. N. Ryabinina¹ ORCID: 0000-0002-4995-0606*,
 R. A. Maiski ORCID: 0000-0001-9000-8919*
¹Federal Scientific Center for Biological Systems and Agrotechnologies of the Russian Academy of Sciences, 29, 9 Yanvary St., Orenburg, Russia, 460000,
²Orenburg State Agrarian University, 18, Chelyuskintsev St., Orenburg, Russia, 460000,
³Ufa State Petroleum Technological University, 1, Kosmonavtov, Ufa, Republic of Bashkortostan, Russia, 450062,
 e-mail: marija-rjabuhina@mail.ru, kalyakina_railya@mail.ru

This article presents the results of the assessment of genetic diversity, genetic structure and differentiation of Scots pine in the conditions of Orenburg Zauralye using intermicrosatellite analysis of DNA polymorphism (markers of 14 isoenzyme loci from the enzyme systems aspartate aminotransferase, glutamate dehydrogenase, leucine neuropathy, and others).

In the studied populations of Scots pine, 51 alleles were detected by the studied molecular genetic markers, most of which were common. The frequency of occurrence of these alleles varied significantly everywhere: 62.7% of allelic

variants are rare or relatively rare (frequency of occurrence is less than 5%). The indicator of the genetic diversity of Scots pine is influenced by the natural and climatic conditions and geographical isolation, resulting in a greater genetic diversity in the population of Karagai forest.

The study of the division of the genetic diversity of Scots pine showed a high level of population genetic diversity and a low degree of divergence in the studied populations: 5.1% accounted for the interpopulation component. Determination of the genetic distance of Nei showed that the populations are closely related. This figure was 0.024. Analysis of allelic diversity indicates a high stability and reliability of the population of Scots pine and its evolutionary perspective.

Keywords: scots pine, genetic diversity, intermicrosatellite DNA polymorphism analysis.

Генетическое разнообразие и внутривидовая дифференциация имеют важное биосферное и ресурсное значение. Знание генетической структуры популяций, уровня их генетической изменчивости, а также характера её распределения в пределах ареала вида позволяет оценить его генетический потенциал. Разработка и обоснование комплекса мероприятий, направленных на максимальное сохранение генетического разнообразия вида в процессе долгосрочного неистощительного природопользования и воспроизводства должна основываться на данных о его генетической структуре [1–4].

При изучении популяций генетическое разнообразие оценивается с использованием различных типов ДНК-маркёров: маркёры, соответствующие гену, аллели которого имеют чётко выраженные отличия на уровне фенотипа; молекулярные маркёры, соответствующие гену или некодирующему участку генома, разные варианты которого отличаются на уровне ДНК; изоферменты [5–7]. Первый тип маркёров косвенно отражают состояние генетических ресурсов, так как основан на изучении наследуемых морфологических признаков. Классическим методом исследования генофонда популяции является изучение генетических процессов с помощью белковых маркёров (изоферментов). В настоящее время широко распространены исследования молекулярных ДНК-маркёров, соответствующих гену или некодирующему участку генома методами блотгибридизации, полимеразной цепной реакции (ПЦР) и ДНК-чипов. При изучении генома голосеменных растений проводится выявление полиморфных и стабильно воспроизводимых при повторных ПЦР ДНК-маркёров, а также молекулярных маркёров, основанных на микросателлитах, в частности метод межмикросателлитного анализа (ISSR-Inter Simple Sequence Repeats). При этом используется ПЦР с несколькими праймерами, которые состоят из tandemных коротких 2–4 нуклеотидных повторов и одного селективного нуклеотида на 3'-конце праймера.

В современной литературе можно встретить данные о генетическом разнообразии разных видов хвойных: сосны обыкновенной [8–10], сосны ладанной [11, 12], сосны Ламберта [13], ели обыкновенной [7], видов рода лиственница [14–16]. Однако исследования носят отрывочный характер. Достоверно установлена географическая изменчивость популяций хвойных, в том числе и сосны обыкновенной, которая распространена на большей части нашей страны. Приспособленность данного вида к большому разнообразию природно-климатических условий обусловлена генетической пластичностью вида.

В условиях степной зоны с низкой лесистостью на территории Оренбуржья лесопокрываемые участки распространены неравномерно, большая часть расположена в Оренбургском Предуралье. С приграничных территорий степей и полупустынь Казахстана через Оренбургское Зауралье шло опустынивание территорий. Однако и на территории Зауралья ещё сохранились островки реликтового леса, которые в доисторические времена были достаточно обширны. Часть этих лесов представлена сосной обыкновенной, которая показала свою перспективность и может являться лесобразующей породой в условиях Оренбуржья. Приоритетность задач лесовосстановления и лесоразведения устойчивых коренных лесобразующих видов в Зауралье обуславливает необходимость изучения генетической структуры перспективных лесобразующих пород.

Целью работы явилась оценка генетического разнообразия, генетической структуры и дифференциации популяций сосны обыкновенной в условиях Оренбургского Зауралья с использованием межмикросателлитного анализа полиморфизма ДНК.

Объекты и методы

Объектами исследований являлись две реликтовые популяции сосны обыкновенной (*Pinus sylvestris* L.), занимающие пограничное положение с культурными насаждениями на

территории Оренбургского Зауралья: Карагайский и Адрианопольский боры. Обе популяции находятся на границе ареала сосны обыкновенной. Однако, природно-климатические условия местопроизрастания отличны. Карагайский бор – скалисто-лесное урочище в ущельеобразной долине реки Губерли. Адрианопольский бор расположен на гранитных массивах древней донеогеновой террасы. Климат на территории Карагай-Покровского бора мягче, зимы более тёплые и снежные: среднемесячная температура января выше на 1,5 °С, высота снежного покрова также выше на 20 см, глубина промерзания почвы на 40 см меньше [17]. В связи с этим, популяции находятся в разных физико-географических и ботанических зонах. Карагай-Покровский бор относится к Южно-Уральской низкогорной лесостепной провинции, богато разнотравным-злаковым степям, Адрианопольский бор – к лесостепной провинции Зауральского плато, разнотравно-ковыльным степям [18].

В обеих популяциях состояние древостоя оценивается как климаксовое, но в то же время отмечаются значительные площади подроста под пологом реликтового древостоя, что представляет значительный интерес в молекулярно-генетических исследованиях естественного самовозобновления популяций *Pinus sylvestris* L.

Для исследования генетической структуры видов ISSR-метод является наиболее популярным, в связи с тем, что он сравнительно быстрый, дешёвый и обладает высокой точностью и улучшенной воспроизводимостью, по сравнению с другими методами [20–22, 24]. Данный метод основывается на выявлении молекулярно-генетических маркёров методом электрофоретического разделения ферментов из экстрактов тканей эндоспермов в вертикальных пластинах полиакриламидного геля с последующим гистохимическим окрашиванием [2, 3].

В настоящих исследованиях маркёрами служили 14 изоферментных локусов из ферментных систем аспартата миотрансферазы, глутамат дегидрогеназы, лейцина минопептидазы, малат-дегидрогеназы, формиат дегидрогеназы, супероксиддисмутазы. Изучая изоферментные электрофоретические спектры на основе идентификации аллельного состава, вычисляли частоту встречаемости аллелей, среднее число аллелей на локус (A), долю полиморфных локусов (P), наблюдаемую (Ho) и ожидаемую (He) гетерозиготность, коэффициент инбридинга (F). На основе F-статистик

Райта и G-статистик Нея определяли степень внутривидовой генетической подразделённости вида. Для количественной оценки генетической дифференциации популяций вычисляли генетическое расстояние Нея (D).

Результаты и обсуждение

В изучаемых популяциях сосны обыкновенной по исследованным молекулярно-генетическим маркерам был выявлен 51 аллель. Большая часть локусов была общей для обеих популяций, а частота их встречаемости варьировала значительно (от 5,0 до 97,1%). 62,7% аллельных вариантов являлись редкими или относительно редкими (частота встречаемости менее 5%). Редкие аллели встречались в обеих популяциях, так как данный признак не является географически приуроченным. Показатели уровня внутривидового генетического разнообразия сосны обыкновенной в популяции Карагайского бора составили: $A = 1,86$; $P = 54,81$; $H = 0,158$; $H_o = 0,133$, Адрианопольского бора – $A = 1,84$; $P = 54,67$; $H = 0,161$; $H_o = 0,131$, что соответствует данным работ [8–10] об изменчивости сосны обыкновенной. Межпопуляционные различия уровня генетического разнообразия в целом были незначительными, что также свидетельствует о высокой стабильности и надёжности популяционных систем сосны обыкновенной и её эволюционной перспективности (табл.).

В Карагайском бору параметры генетического разнообразия популяции были выше по сравнению с популяцией Адрианопольского бора, что подтверждает гипотезу З. Х. Шигапова с соавторами о том, что большая гетерозиготность обеспечивает популяции сосны обыкновенной выживаемость в жёстких природно-климатических условиях [23, 24].

Изучение подразделённости генетического разнообразия сосны обыкновенной показало высокий уровень популяционного генетического разнообразия и низкую степень дивергенции в изучаемых популяциях: 5,1% приходилось на межпопуляционную составляющую. Определение генетического расстояния Нея (D) показало близкородственность популяций. Данный показатель составил 0,024.

Доля полиморфных локусов является количественным показателем генетического разнообразия популяции, расчёт индекса Шеннона позволил выявить наибольшее ге-

Таблица / Table

Генетическая изменчивость сосны обыкновенной (в среднем в популяции)
Genetic variability of Scots pine (on average in the population)

Популяция Population	Число деревьев Number of trees	Среднее число аллелей на локус Average number of alleles per locus	Доля по- лиморфных локусов The proportion of polymorphic loci	Гетерозиготность Heterozygosity		Коэффи- циент инбри- динга Inbreeding coefficient	Индекс Шеннона Shannon Index
				наблюдаемая observable	ожидаемая expected		
Карагайский бор Karagai boron	181	1,860± 0,026*	54,810± 0,017*	0,133*	0,158*	0,164*	0,300± 0,025
Адриано- польский бор Andrianopol boron	167	1,840± 0,024*	54,570± 0,035*	0,131*	0,161*	0,196*	0,170± 0,022

Примечание: * $p < 0,05$ / Note: * $p < 0.05$.

нетическое разнообразие в популяции сосны обыкновенной в Карагай-Покровском бору ($0,300 \pm 0,025$) по сравнению с Адрианопольским бором ($0,170 \pm 0,022$).

Причиной этого является обособленность популяции сосен Карагай-Покровского бора и значительная географическая их удалённость от других массивов (более 250 км), а также антропогенная изоляция территории, уникальные ландшафтно-геоморфологические условия произрастания. Карагай-Покровский бор является реликтом ледникового периода, когда массивы сосново-берёзовых и сосново-лиственных лесов были широко распространены среди степей [18].

Заключение

Таким образом, анализ аллельного разнообразия свидетельствует о высокой стабильности и надёжности популяционных систем сосны обыкновенной и её эволюционной перспективности. Изучаемые популяции являются близкими в генетическом отношении. Однако высокое генетическое разнообразие внутри популяций свидетельствует об их устойчивости и значительном адаптационном потенциале. В связи с этим целесообразно рекомендовать Министерству природных ресурсов, экологии и имущественных отношений, Министерству лесного и охотничьего хозяйства Оренбургской области в качестве лесных генетических резерватов территории, на которых расположены реликтовые популяции *Pinus sylvestris* L.

Литература

- Алтухов Ю.П. Динамика генофондов при антропогенных воздействиях // Вестник ВОГиС. 2004. Т. 8. № 2. С. 40–59.
- Боронникова С.В. Молекулярно-генетический анализ и оценка состояния генофондов ресурсных видов растений Пермского края. Пермь: Пермский государственный национальный исследовательский университет, 2013. 223 с.
- Динамика популяционных генофондов при антропогенных воздействиях / Под ред. Ю.П. Алтухова. М.: Наука, 2004. 619 с.
- Крутовский К.В. Перспективы использования геномных исследований в лесном хозяйстве // Сибирский лесной журнал. 2014. № 4. С. 11–15.
- Гончаренко Г.Г., Падутов В.Е., Потенко В.В. Руководство по исследованию хвойных видов методом электрофоретического анализа изоферментов. Гомель: БелНИИЛХ, 1989. 164 с.
- Brookes A.J. The essence of SNP // Gene. 1999. V. 234. P. 177–186.
- Heinze B., KozielMonte A., Jahn D. Analysis of variation in chloroplast DNA sequences // Methods in molecular biology: Methods and Protocols. 2014. V. 1115. P. 85–120.
- Pyhäjärvi T., García-Gil M.R., Knürr T., Mikkonen M., Wachowiak W., Savolainen O. Demographic history has influenced nucleotide diversity in European *Pinus sylvestris* populations // Genetics. 2007. V. 177. P. 1713–1724.
- Wachowiak W., Balk P.A., Savolainen O. Search for nucleotide diversity patterns of local adaptation in dehydrins and other cold-related candidate genes in Scots pine (*Pinus sylvestris* L.) // Tree Genetics & Genomes. 2009. V. 5. No. 1. P. 117–132.

10. Видякин А.И., Боронникова С.В., Нечаева Ю.С., Пришневская Я.В., Бобошина И.В. Генетическая изменчивость, структура и дифференциация популяций сосны обыкновенной (*Pinus sylvestris* L.) на северо-востоке Русской равнины по данным молекулярно-генетического анализа // Генетика. 2015. Т. 51. № 12. С. 1401–1409.

11. Gonzalez-Martinez S.C., Wheeler N.C., Ersoz E. Association genetics in *Pinus taeda* L. I. Wood property traits // Genetics. 2007. V. 175. P. 399–409.

12. Chhatre V.E., Byram T.D., Neale D.B., Wegrzyn J.L., Krutovsky K.V. Genetic structure and association mapping of adaptive and selective traits in the East Texas loblolly pine (*Pinus taeda* L.) breeding populations // Tree Genetics & Genomes. 2013. V. 9. No. 5. P. 1161–1178.

13. Vangestel C., Vázquez-Lobo A., Martínez-García P.J., Calic I., Wegrzyn J.L., Neale D.B. Patterns of neutral and adaptive genetic diversity across the natural range of sugar pine (*Pinus lambertiana* Dougl.) // Tree Genetics & Genomes. 2016. V. 12. P. 51.

14. Heuertz M., De Paoli E., Källman T., Larsson H., Jurman I., Morgante M., Lascoux M., Gyllenstrand N. Multilocus patterns of nucleotide diversity, linkage disequilibrium and demographic history of Norway spruce (*Picea abies* [L.] Karst) // Genetics. 2006. V. 174. P. 2095–2105.

15. Wei X.-X., Wang X.-Q. Recolonization and radiation in *Larix* (Pinaceae): evidence from nuclear ribosomal DNA paralogues // Mol. Ecology. 2004. No. 13. P. 3115–3123.

16. Khatib I.A., Ishiyama H., Inomata N., Wang X.-R., Szmidt A.E. Phylogeography of Eurasian *Larix* species inferred from nucleotide variation in two nuclear genes // Genes Genet. Syst. 2008. No. 83. P. 55–56.

17. Чибилёв А.А. Физико-географическое районирование Южного Урала как основа для формирования экологического каркаса региона // Степи Северной Евразии: Материалы седьмого международного симпозиума. Оренбург, 2015. С. 916–919.

18. Рябинина З.Н. Конспект флоры Оренбургской области. Екатеринбург: Ин-т степи УрО РАН, 1998. 163 с.

19. Farjon A. Conifers. London: Royal Botanic Gardens Kew, 2001. 309 p.

20. Ganopoulos J., Tsaballa A., Xanthopoulou A., Madaris P., Tsaftaris A. Sweet cherry cultivar identification by high-resolution-melting (HRM) analysis using gene-based SNP markers // Plant Molecular Biology Reporter. 2013. No. 31 (3). P. 763–768.

21. Крутовский К.В. От популяционной генетике к популяционной геномике лесных древесных видов: интегрированный популяционно-геномный подход // Генетика. 2006. Т. 42 (10). С. 1304–1318.

22. Пименов А.В., Седельникова Т.С. Биоразнообразие хвойных на болотах Западной Сибири // Торфяники Западной Сибири и цикл углерода: прошлое и настоящее: Материалы Второго международного полевого симпозиума. Томск, 2007. С. 76–77.

23. Savinykh N.P., Lelekova E.V., Shakleina M.N. About the promotion of natural restoration of *Pinus sylvestris* L. // Теоретическая и прикладная экология. 2018. № 4. С. 108–113.

24. Шигапов З.Х., Шигапова А.И., Уразбахтина К.А. Генетическая изменчивость и популяционная структура на лиственницы на Урале // Вестник ОГУ. 2009. № 6 (194). С. 438–440.

References

1. Altukhov Y.P. Dynamics of gene pools under anthropogenic influences // Vestnik VOGiS. 2004. V. 8. No. 2. P. 40–59 (in Russian).

2. Boronnikova S.V. Molecular genetic analysis and assessment of the state of gene pools of plant species of the Perm region. Perm': Perm state research university, 2013. 223 p. (in Russian).

3. Dynamics of population gene pools under anthropogenic influences / Ed. Yu.P. Altukhov. Moskva: Nauka, 2004. 619 p. (in Russian).

4. Krutovskiy K.V. Prospects for the use of genomic research in forestry // Sibirskiy lesnoy zhurnal. 2014. No. 4. P. 11–15 (in Russian).

5. Goncharenko G.G., Padutov V.E., Potenko V.V. Guide to the study of coniferous species by electrophoretic analysis of isoenzymes. Gomel': BelNIILKH, 1989. 164 p. (in Russian).

6. Brookes A.J. The essence of SNP // Gene. 1999. V. 234. P. 177–186.

7. Heinze B., KozielMonte A., Jahn D. Analysis of variation in chloroplast DNA sequences // Methods in molecular biology: Methods and Protocols. 2014. V. 1115. P. 85–120.

8. Pyhäjärvi T., García-Gil M.R., Knürr T. Demographic history has influenced nucleotide diversity in European *Pinus sylvestris* populations // Genetics. 2007. V. 177. P. 1713–1724.

9. Wachowiak W., Balk P.A., Savolainen O. Search for nucleotide diversity patterns of local adaptation in dehydrins and other cold-related candidate genes in Scots pine (*Pinus sylvestris* L.) // Tree Genetics & Genomes. 2009. V. 5. No. 1. P. 117–132.

10. Vidyakin A.I., Boronnikova S.V., Nechayeva Yu.S., Prishnivskaya Ya.V., Boboshina I.V. Genetic variability, structure and differentiation of Scots pine (*Pinus sylvestris* L.) populations in the northeast of the Russian Plain according to molecular genetic analysis // Genetika. 2015. V. 51. No. 12. P. 1401–1409 (in Russian).

11. Gonzalez-Martinez S.C., Wheeler N.C., Ersoz E. Association genetics in *Pinus taeda* L. I. Wood property traits // Genetics. 2007. V. 175. P. 399–409.

12. Chhatre V.E., Byram T.D., Neale D.B., Wegrzyn J.L., Krutovsky K.V. Genetic structure and association mapping of adaptive and selective traits in the East Texas loblolly pine (*Pinus taeda* L.) breeding populations // Tree Genetics & Genomes. 2013. V. 9. No. 5. P. 1161–1178.

13. Vangestel C., Vázquez-Lobo A., Martínez-García P.J., Vangestel C., Vázquez-Lobo A., Martínez-García P.J., Calic I., Wegrzyn J.L., Neale D.B. Patterns of neutral and adaptive genetic diversity across the natural range of sugar pine (*Pinus lambertiana* Dougl.) // *Tree Genetics & Genomes*. 2016. V. 12. P. 51.
14. Heuertz M., De Paoli E., Källman T., Larsson H., Jurman I, Morgante M, Lascoux M, Gyllenstrand N. Multilocus patterns of nucleotide diversity, linkage disequilibrium and demographic history of Norway spruce (*Picea abies* [L.] Karst) // *Genetics*. 2006. V. 174. P. 2095–2105.
15. Wei X.-X., Wang X.-Q. Recolonization and radiation in *Larix* (Pinaceae): evidence from nuclear ribosomal DNA paralogues // *Mol. Ecology*. 2004. No. 13. P. 3115–3123.
16. Khatab I.A., Ishiyama H., Inomata N., Wang X.-R., Szmidt A.E. Phylogeography of Eurasian *Larix* species inferred from nucleotide variation in two nuclear genes // *Genes Genet. Syst.* 2008. No. 83. P. 55–56.
17. Chibilov A.A. Physical and geographical zoning of the Southern Urals as the basis for the formation of the ecological framework of the region // *Steppes of Northern Eurasia: Proceedings of the Seventh International Symposium*. Orenburg, 2015. P. 916–919 (in Russian).
18. Ryabinina Z.N. Summary of the flora of the Orenburg region. Ekaterinburg: Ural Branch of the Institute of Steppe of the Russian Academy of Sciences. 1998. 163 p. (in Russian).
19. Farjon A. Conifers. Royal Botanic Gardens Kew. 2001. 309 p.
20. Ganopoulos J., Tsaballa A., Xanthopoulou A. Sweet cherry cultivar identification by High-Resolution-Melting (HRM) analysis using gene-based SNP markers // *Plant Molecular Biology Reporter*. 2013. V. 31. No. 3. P. 763–768. doi: 10.1007/s11105-012-0538
21. Krutovskiy K.V. From population genetics to population genomics of forest tree species: an integrated population-genomic approach // *Genetika*. 2006. V. 42. No. 10. P. 1304–1318 (in Russian).
22. Pimenov A.V., Sedelnikova T.S. Coniferous biodiversity in the swamps of Western Siberia // *Peatlands of Western Siberia and the carbon cycle: past and present: materials of the Second International Field Symposium*. Tomsk, 2007. P. 76–77 (in Russian).
23. Savinykh N.P., Lelekova E.V., Shakleina M.N. About the promotion of natural restoration of *Pinus sylvestris* L. // *Theoretical and Applied Ecology*. 2018. No. 4. P. 108–113 (in Russian). doi: 10.25750/1995-4301-2018-4-108-113
24. Shigapov Z.K., Shigapova A.I., Urazbakhtina K.A. Genetic variation and population structure in the Ural larches // *Vestnik OGU*. 2009. No. 6. P. 438–440 (in Russian).

Идентификация двух ризосферных изолятов стрептомицетов и изучение *in vitro* их колонизирующей активности

© 2019. Я. И. Назарова¹, н. с., аспирант,
И. Г. Широких^{1,2,3}, д. б. н., в. н. с., профессор,
А. В. Бакулина¹, к. б. н., зав. лабораторией, Е. Н. Баранова⁴, к. б. н., в. н. с.,
Т. Я. Ашихмина^{2,3}, д. т. н., профессор, г. н. с., зав. лабораторией,
¹ФАНЦ Северо-Востока им. Н. В. Рудницкого,
610007, Россия, г. Киров, ул. Ленина, д. 166 а,
²Институт биологии Коми НЦ УрО РАН,
167982, Россия, г. Сыктывкар, ул. Коммунистическая, д. 28,
³Вятский государственный университет,
610000, Россия, г. Киров, ул. Московская, д. 36,
⁴ВНИИ сельскохозяйственной биотехнологии,
127550, Россия, г. Москва, ул. Тимирязевская, д. 42,
e-mail: irgenal@mail.ru

Разработка экологически безопасных биологических препаратов для защиты сельскохозяйственных культур от поражения вредоносными грибами и бактериями имеет особую актуальность в связи с массовым заселением пахотных почв Российской Федерации токсигенными и фитопатогенными микроорганизмами. Из ризосферы растений семейства Solanaceae – томата (*Solanum lycopersicum* L.) и табака (*Nicotiana tabacum* L.) – были изолированы два штамма актинобактерий, один из которых проявил фиторегуляторное (ТК-5), другой – антагонистическое действие в отношении тест-культур грибов и бактерий (Т-2-20). По результатам секвенирования фрагмента гена 16S рРНК и сравнительного анализа полученных нуклеотидных последовательностей с имеющимися в базе данных GenBank, установлено филогенетическое положение изолятов *Streptomyces flavogriseus* ТК-5 и *S. anulatus* Т-2-20 рода *Streptomyces*, семейства Streptomycetaceae, порядка Actinomycetales, класса Actinobacteria. Для оценки перспектив их практического использования выясняли *in vitro* способность изолятов колонизировать ткани и органы картофеля (*Solanum tuberosum* L.), как представителя того же семейства. Показано, что спустя 35 сут с момента инокуляции микрочеренков, стрептомицеты обнаруживались в листьях, стеблях и корнях меристемных растений картофеля. Плотность заселения отдельных органов варьировала от сотен до десятков миллионов КОЕ/г воздушно-сухой массы, в зависимости от штамма и его локализации в фитосфере. Факт колонизации корней актиномицетным мицелием подтвержден результатами сканирующей электронной микроскопии. Численность обоих штаммов после поверхностной отмывки водой снижалась в следующем порядке (КОЕ/г): инокулированные листья (10^7 – 10^9), корни (10^6 – 10^7), листья (10^5 – 10^6), стебли (10^2 – 10^4). Различия между штаммами в колонизирующей способности связаны, очевидно, с продукцией одним из них (ТК-5) лектинов (титры геммагглютинации 1:10–1:25) – метаболитов, участвующих в формировании ассоциативного взаимодействия мицелиальных прокариот с растением. Сравнительный анализ морфометрических показателей растений показал, что колонизация стрептомицетами не оказала негативного влияния на рост и развитие картофеля *in vitro* и *ex vitro*. Полученные результаты дают основание к использованию изученных изолятов *S. flavogriseus* ТК-5 и *S. anulatus* Т-2-20 при создании экологически безопасных биопрепаратов и агротехнологий.

Ключевые слова: *Streptomyces*, таксономическое положение, 16SpРНК, Solanaceae, ризосфера, филлосфера, колонизация, прокариотный мицелий, морфометрические показатели.

Identification of two strains of streptomycetes from the rhizosphere and *in vitro* study of their colonizing activity

© 2019. Ya. I. Nazarova¹ ORCID: 0000-0002-2945-5282, I. G. Shirokikh^{1,2,3} ORCID: 0000-0002-3319-2729,
A. V. Bakulina¹ ORCID: 0000-0002-5171-2476, E. N. Baranova⁴ ORCID: 0000-0001-9832-3948,
T. Ya. Ashikhmina^{2,3} ORCID: 0000-0003-4919-0047

¹Federal Scientific Agricultural Center of the North-East,
166a, Lenina St., Kirov, Russia, 610007,

²Vyatka State University,
36, Moskovskaya St., Kirov, Russia, 610000,

³Institute of Biology of the Komi Science Centre of the Ural Branch of RAS, 28, Kommunisticheskaya St., Syktyvkar, Russia, 167982,
⁴All-Russia Research Institute of Agricultural Biotechnology, 42, Timiryazevskaya St., Moscow, Russia, 127550,
 e-mail: irgenal@mail.ru

The development of environmentally safe biological preparations to protect crops from harmful fungi and bacteria is of particular relevance in connection with the mass settlement of arable soils of the Russian Federation by toxigenic and phytopathogenic microorganisms. From the rhizosphere of plants of the family Solanaceae – tomato (*Solanum lycopersicum* L.) and tobacco (*Nicotiana tabacum* L.) – two strains of actinobacteria were isolated, one of which showed aphytoregulatory (TK-5), the other – antagonistic action against test cultures of fungi and bacteria (T-2-20). According to the results of sequencing of the 16S rRNA gene fragment and comparative analysis of the nucleotide sequences obtained with those available in the GenBank database, the phylogenetic position of isolates was established: *Streptomyces flavogriseus* TK-5 and *S. anulatus* T-2-20 of the *Streptomyces* genus, the Streptomycetaceae family, of the order Actinomycetales, class Actinobacteria. To assess the prospects of their practical use, the ability of isolates to colonize potato tissues and organs (*Solanum tuberosum* L.) as a representative of the same family was investigated in vitro. It is shown that after 35 days since inoculation, streptomycetes were found in the leaves, stem and roots meristem potato plants. The population density of individual organs varied from hundreds to tens of millions of CFU/g air dry mass, depending on the strain and its localization in the phytosphere. The fact of colonization of roots by actinomycetes mycelium is confirmed by the results of scanning electron microscopy. The number of both strains, after surface washing with water, decreased in the following order (CFU/g): inoculated leaf (10^7 – 10^9), roots (10^6 – 10^7), leaves (10^5 – 10^6), stems (10^2 – 10^4). The differences between the strains in colonizing capacity are obviously related to the production of one of them (TK-5) lectins (hemagglutination titers 1:10–1:25) – metabolites involved in the formation of associative interaction of mycelial prokaryotes with the plant. Comparative analysis of morphometric parameters of plants showed that the colonization by streptomycetes did not have a negative impact on the growth and development of potatoes in vitro and ex vitro. The obtained results provide a basis for the use of the studied isolates *S. flavogriseus* TK-5 and *S. anulatus* T-2-20 in the creation of environmentally friendly biological products and agricultural technologies.

Keywords: *Streptomyces*, taxonomic position, 16S rRNA, *Solanaceae*, rhizosphere, phyllosphere, colonization, prokaryotic mycelium, morphometric parameters.

Особое внимание при разработке биопестицидов привлекают практически неограниченные метаболические возможности представителей рода *Streptomyces* – самого насыщенного в видовом отношении рода в классе *Actinobacteria*. Первоначальные знания в отношении биологии стрептомицетов были накоплены вследствие использования их антибиотического потенциала в медицине и фармакологии [1, 2]. В дальнейшем, с появлением технологий секвенирования, было установлено, что доля генома, детерминирующая продукцию вторичных метаболитов, у стрептомицетов гораздо значительнее (~ от 5 до 10%), чем у других бактерий [3]. Геномы *Streptomyces* spp. содержат множественные кластеры генов, контролирующих продукцию вторичных метаболитов. Особый интерес представляют генные кластеры, кодирующие нерибосомные пептидсинтазы (НРПС) и поликетидсинтазы (ПКС), связанные с продукцией антибиотиков [3, 4]. Отдельные штаммы несут до 30 различных генов ПКС и НРПС, но большинство из них транскрипционно неактивны в обычных условиях лабораторного культивирования [5]. Полагают, что выяснение биологических функций этих генов в природе, а также путей их активации будет

содействовать разработке штаммов, представляющих интерес для использования в защите растений и других агробiotехнологиях [6].

Для практической реализации метаболического потенциала микроорганизмов необходимым условием является способность вступать в тесные ассоциативные связи с растением-хозяином, колонизируя его ткани и органы. Популяционная структура стрептомицетов, как организмов со сложным жизненным циклом, представлена спорами и вегетативным мицелием. Сведений о способности отдельных видов и штаммов стрептомицетов в процессе мицелиального роста заселять поверхности и проникать во внутренние ткани растений в настоящее время недостаточно.

В задачи настоящей работы входило выяснение таксономического положения двух различных изолятов из ризосферы паслёновых растений и получение информации об их способности колонизировать ткани другого вида растения из этого же семейства.

Объекты и методы

Объектами исследования служили штамм ТК-5, выделенный из ризосферы томата (*Solanum lycopersicum* L.), и штамм Т-2-20 из

ризосферы табака (*Nicotiana tabacum* L.). Антагонистическую активность изолятов определяли методом диффузии в агар [7], продукцию ауксинов – с реактивом Сальковского [8], синтез лектинов – методом гемагглютинации [9].

Таксономическое положение исследуемых штаммов определяли на основе анализа фрагментов 16S рРНК в НПК «Синтол» (г. Москва). Полученную нуклеотидную последовательность сопоставляли с материалом, депонированным в генбанке NCBI с использованием пакета программ BLAST (<http://blast.ncbi.nlm.nih.gov/>). Множественное выравнивание нуклеотидных последовательностей и построение филогенетического дерева осуществляли с помощью программы MEGA-X (<https://www.megasoftware.net/>). Выравнивание нуклеотидных последовательностей проводили, используя алгоритм ClustalW. Для построения дерева использовали метод наибольшего правдоподобия – maximum likelihood. Штамм *Rhodococcus rhodochrous* DSM43274T был выбран как референсный организм, не принадлежащий к роду *Streptomyces*.

Объектом для инокуляции служили пробирочные растения меристемного картофеля (*Solanum tuberosum* L.) сорта Пранса. Микрочеренкование растений осуществляли на среде Мурасиге и Скуга [10] без гормонов с 20 г/л сахарозы. Культуры стрептомицетов выращивали в течение 4 сут в жидкой овсяной среде на качалке (120 об./мин). Титры инокулятов для штаммов ТК-5 и Т-2-20 составили 10^7 – 10^9 и 10^6 – 10^7 КОЕ/мл соответственно. Поскольку освоение благоприятных зон у стрептомицетов связано с мицелиальным ростом и в меньшей степени, чем для немиецелиальных бактерий, зависит от начальной численности популяции [11], титры инокулятов для разных штаммов сочли возможным не выравнивать. Инокуляцию осуществляли в ходе микрочеренкования, капельно нанося на лист картофеля по 10 мкл инокулята. Контролем служили микрочеренки того же сорта и возраста без инокуляции.

Пробирочные растения картофеля выращивали при следующем режиме: фотопериод 16 ч, освещённость 4 клк, температура воздуха $23 \pm 1 / 16 \pm 1$ °С (день/ночь). Морфометрические показатели у 15 растений в каждом варианте определяли в возрасте 20, 30 и 60 сут.

Для определения численности бактерий, колонизирующих отдельные органы, объединяли по отдельности корни, стебли и листья (за исключением инокулированных) от десяти растений в каждом из вариантов опыта и асептически растирали их в ступке. Раз-

ведения гомогенатов высевали на овсяный агар. Количество колониеобразующих единиц (КОЕ) учитывали через 7 сут, выражая его на 1 г воздушно-сухой массы субстрата. Для выяснения способности штаммов проникать внутрь тканей посев проводили с добавлением этапа отмывания растительного материала в стерильной дистиллированной воде. Для анализа использовали растения картофеля в возрасте 35 и 60 сут.

Для электронной микроскопии отделяли от корешков фрагменты длиной 4–5 мм и фиксировали в Na-фосфатном буфере (рН 7,2 ед.) с добавлением 2,5% глутарового альдегида в течение 10 сут при +4 °С. Фиксатор отмывали буфером и обезвоживали образцы в водных растворах этанола в повышающихся концентрациях 30–50–70%. После двухкратной промывки абсолютным этанолом образцы помещали в прибор Hitachi HCP2 (Япония) для высушивания в атмосфере CO₂. Высушенные препараты крепили на скотч и производили напыление золотом (толщиной 15–20 нм) в атмосфере аргона. Для анализа расположения объектов на поверхности корня использовали микроскоп JSM-6380LA (Jeol, Япония) при ускоряющем напряжении 20 кВ в режиме SE (регистрации вторичных электронов). В работе использовали материалы и оборудование лаборатории электронной микроскопии биологического факультета МГУ им. М. В. Ломоносова.

Для оценки влияния стрептомицетов на продуктивность картофеля пробирочные растения высаживали в сосуды с почвой, и выращивали в условиях естественного освещения и влажности. Количество, массу и размеры миниклубней учитывали по окончании вегетации (95 сут).

Статистическую обработку данных проводили стандартными методами с помощью пакета программ Microsoft Excel 2007.

Результаты и обсуждение

Выбору штаммов для изучения способности мицелиальных прокариот колонизировать растения предшествовало изучение их антагонистической активности, способности продуцировать фитогормоны (индолил-3-уксусную кислоту – ИУК) и лектины.

Штамм ТК-5 подавлял рост двух из шести тест-культур, отличался значительной продукцией ИУК в присутствии 200 мг/л триптофана и образованием лектинов, которые обнаруживались реакцией гемагглютинации

Таблица 1 / Table 1

Сравнительная характеристика метаболической активности исследуемых штаммов стрептомицетов
Comparative characteristics of metabolic activity of the studied strains of streptomycetes

Показатели / Indicators	Штаммы / Strains		
	ТК-5	Т-2-20	
Зоны подавления роста тест-культур, мм Zones of suppression of growth of test cultures, mm			
<i>Fusarium avenaceum</i>	0	18	
<i>F. culmorum</i>	24	20	
<i>Bipolaris sorokiniana</i>	0	25	
<i>Erwinia herbicola</i>	0	21	
<i>Arthrobacter simplex</i>	0	21	
<i>Pseudomonas putida</i>	25	0	
Продукция ИУК, мг/мл / Synthesis of IAA, mg/ml	52,0	9,3	
Гемагглютинирующая активность СКЖ в разведениях Hemagglutinating activity of CLS in dilutions			
	1:10	есть/yes	нет/no
	1:25	есть/yes	нет/no
	1:50	нет/no	нет/no

в супернатанте культуральной жидкости (СКЖ) и разведениях СКЖ 1:10 и 1:25 (табл. 1). Штамм Т-2-20 характеризовался более широким (против пяти тест-культур) спектром антагонистического действия, но меньшей продукцией ауксинов. СКЖ данного штамма не оказывал на эритроциты агглютинирующего действия, что говорит об отсутствии у штамма Т-2-20 лектинов.

Лектины представляют собой гликопротеины, способные обратимо и избирательно связывать углеводы и углеводные детерминанты биополимеров без изменения их структуры. Это свойство лежит в основе многочисленных биологических функций лектинов, и на нём основана их способность агглютинировать эритроциты. Среди почвенных стрептомицетов ранее гемагглютинирующая активность была обнаружена у антагонистов фитопатогенов [12] и устойчивых к тяжёлым металлам штаммов [13]. В данной работе выясняли возможную связь лектинов ризосферных стрептомицетов с колонизацией растительных тканей.

Таким образом, штаммы ТК-5 и Т-2-20 были отобраны для дальнейших исследований по наличию признаков, ценных при ассоциативном взаимодействии с растением.

Таксономическая идентификация, основанная на анализе фрагментов генов 16S рРНК, показала, что штаммы ТК-5 и Т-2-20 являются представителями рода *Streptomyces*, семейства *Streptomycetaceae*, порядка *Actinomycetales*, класса *Actinobacteria*. Поисковым сервисом BLAST в качестве наиболее близкого (98,59% сходства) по последовательности

16S рРНК к исследуемому штамму ТК-5 был предложен депонированный в NCBI штамм *S. flavogriseus* CBS 101.34 (NR028988.1). Достоверность кластеризации стрептомицета ТК-5 с *S. flavogriseus* CBS 101.34 (NR 028988.1) составила 98% (рис. 1).

В качестве наиболее близких к штамму Т-2-20 из имеющихся в ГенБанке по последовательностям 16S рРНК поисковый сервер предложил два штамма – *S. pratensis* ch 24 (NR 125616.1) (98,77% сходства) и *S. anulatus* NBRC (NR 112527.1) (98,77% сходства). Достоверность кластеризации стрептомицета Т-2-20 с тем и другим составила 92% (рис. 2).

Генетические данные были сопоставлены с ранее полученной информацией об их фенотипических свойствах, согласно ключу Гаузе [14]. В данном определителе нет описания морфологических и культуральных признаков вида *S. anulatus*, но в отношении его базидиома *S. chrysomallus* subsp. *fumigates* Frommer 1959 [15] сказано, что данный вид можно отнести к серии *Cinereus Aureus* (С. 76). Таким образом, из двух предложенных для стрептомицета Т-2-20 была выбрана последовательность, принадлежащая штамму *S. anulatus* NBRC (NR 112527.1), как наиболее соответствующая фенотипически. Выявление у *S. anulatus* Т-2-20 широкого спектра антагонистической активности хорошо согласуется с ранее описанным синтезом различными представителями этого вида таких антибиотиков, как актиномицин, эндофеназины А, В и С, тубермицин В, эпокарбазолин и эпокарбазолин В, актиномицин С, а также фермента

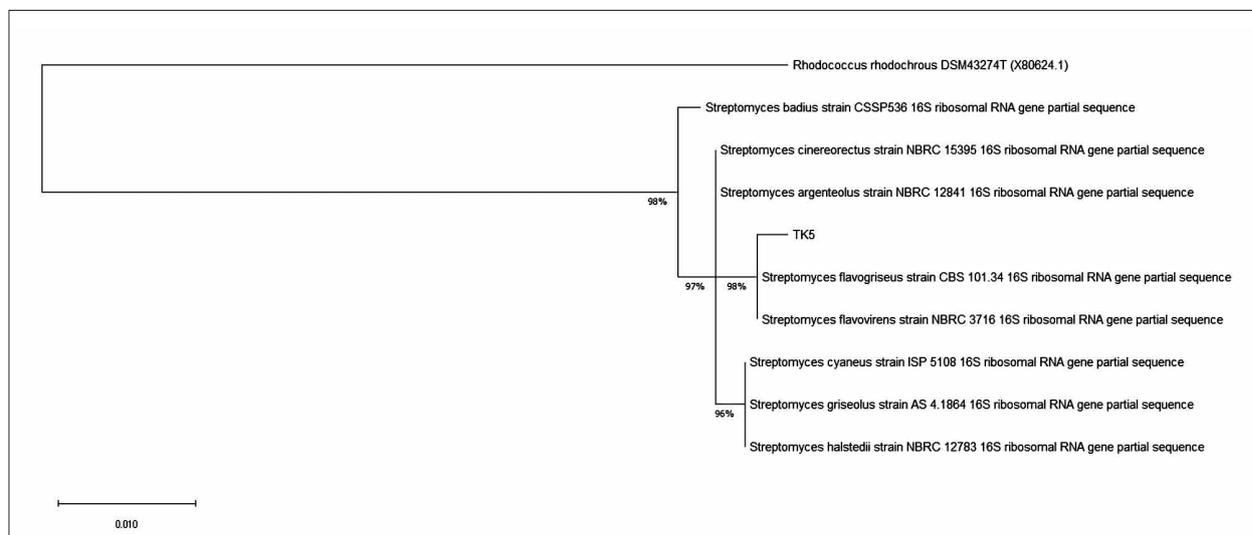


Рис. 1. Филогенетическое дерево, полученное на основании анализа последовательностей фрагмента гена 16S рРНК штамма ТК-5 и его ближайших родственников, найденных сервисом BLAST.

Масштаб соответствует одной нуклеотидной замене на 100 нуклеотидов

Fig. 1. Phylogenetic tree (based on 16S rRNA gene sequences) of TK-5 strain and its closest relatives found by BLAST. The scale corresponds to one nucleotide replacement per 100 nucleotides

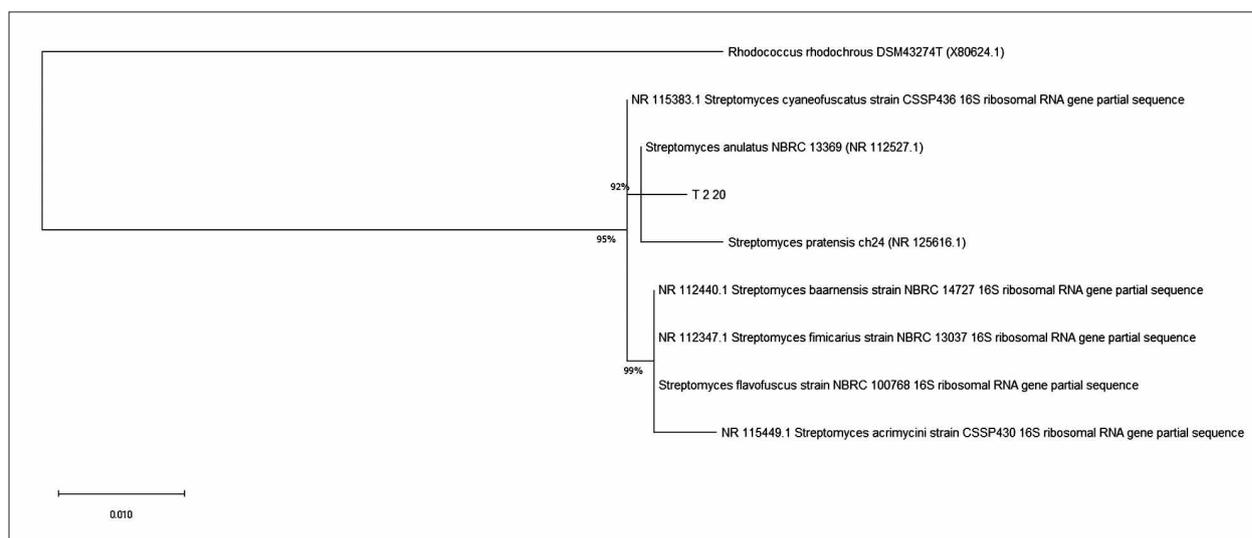


Рис. 2. Филогенетическое дерево, полученное на основании анализа последовательностей фрагмента гена 16S рРНК штамма Т-2-20 и его ближайших родственников, найденных сервисом BLAST.

Масштаб соответствует одной нуклеотидной замене на 100 нуклеотидов

Fig. 2. Phylogenetic tree (based on 16S rRNA gene sequences) of T-2-20 strain and its closest relatives found by BLAST. The scale corresponds to one nucleotide replacement per 100 nucleotides

декстраназы и ингибитора теломеразы – тело-местатина [16].

Изучение колонизирующей активности ризосферных штаммов *S. flavogriseus* ТК-5 и *S. anulatus* Т-2-20 показало, что с инокулированного листа стрептомицеты активно распространялись по растительным тканям и, спустя 35 сут после инокуляции, методом посева штамм ТК-5 обнаруживался практически во всех органах, а штамм Т-2-20 – в стеблях и корнях меристемного картофеля (рис. 3).

Между штаммами были установлены различия в активности колонизации отдельных органов. Так, численность *S. flavogriseus* ТК-5 в корнях $((6,05 \pm 0,79) \cdot 10^6$ КОЕ/г) на три порядка превысила таковую в листьях $((6,3 \pm 1,4) \cdot 10^3$ КОЕ/г) и стеблях $((1,3 \pm 0,02) \cdot 10^3$ КОЕ/г), тогда как *S. anulatus* Т-2-20 в большем количестве обнаруживался в стеблях $((7,8 \pm 2,8) \cdot 10^5$ КОЕ/г), в меньшем – в корнях $((6,5 \pm 2,8) \cdot 10^4$ КОЕ/г), а в листьях не обнаруживался вовсе.

Большее сродство штамма ТК-5 к корням, чем к листьям колонизируемых растений,

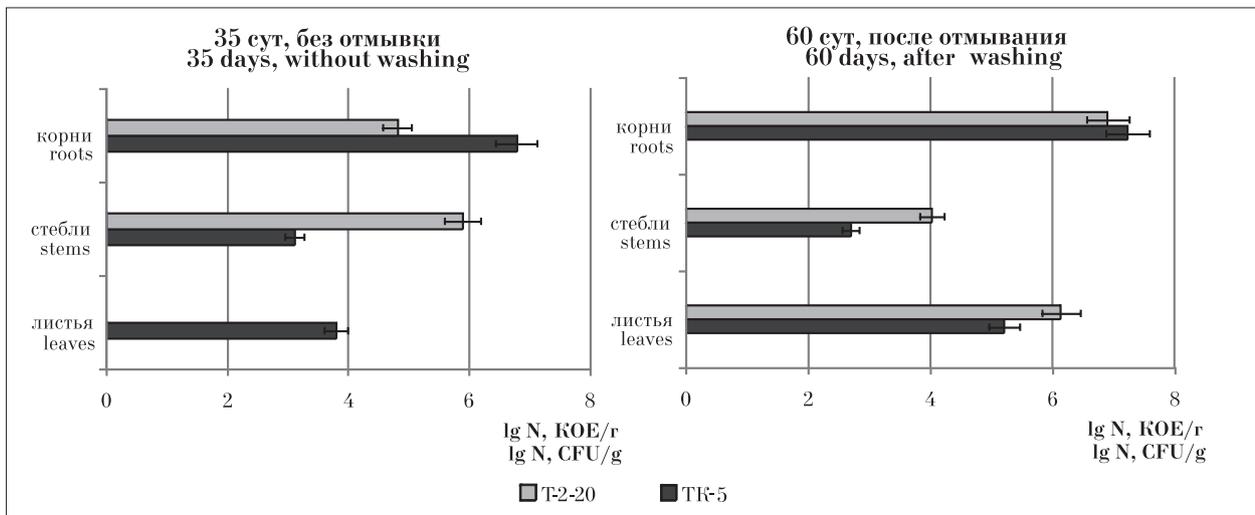


Рис. 3. Численность (lg N, КОЕ/г) стрептомицетов в различных органах меристемного картофеля в зависимости от исследуемого штамма и возраста растения
Fig. 3. Number (lg N, CFU/g) of streptomycetes in various organs of meristem potato depending on the studied strain and age of the plant

а также более высокая в сравнении со штаммом Т-2-20 колонизирующая активность, могут быть связаны со способностью ТК-5 продуцировать ауксины и лектины-метаболиты, участвующие в формировании ассоциативного взаимодействия мицелиальных прокариот с растением.

Результаты определения численности стрептомицетов при посеве из разведений тка-

невых гомогенатов были дополнены результатами электронной сканирующей микроскопии, которая позволила визуализировать результаты инокуляции листьев микрочеренков штаммами ТК-5 и Т-2-20 – колонизацию стрептомицетным мицелием корней пробирочных растений картофеля (рис. 4).

Различия в колонизации разными штаммами стали менее явными, когда микрорас-

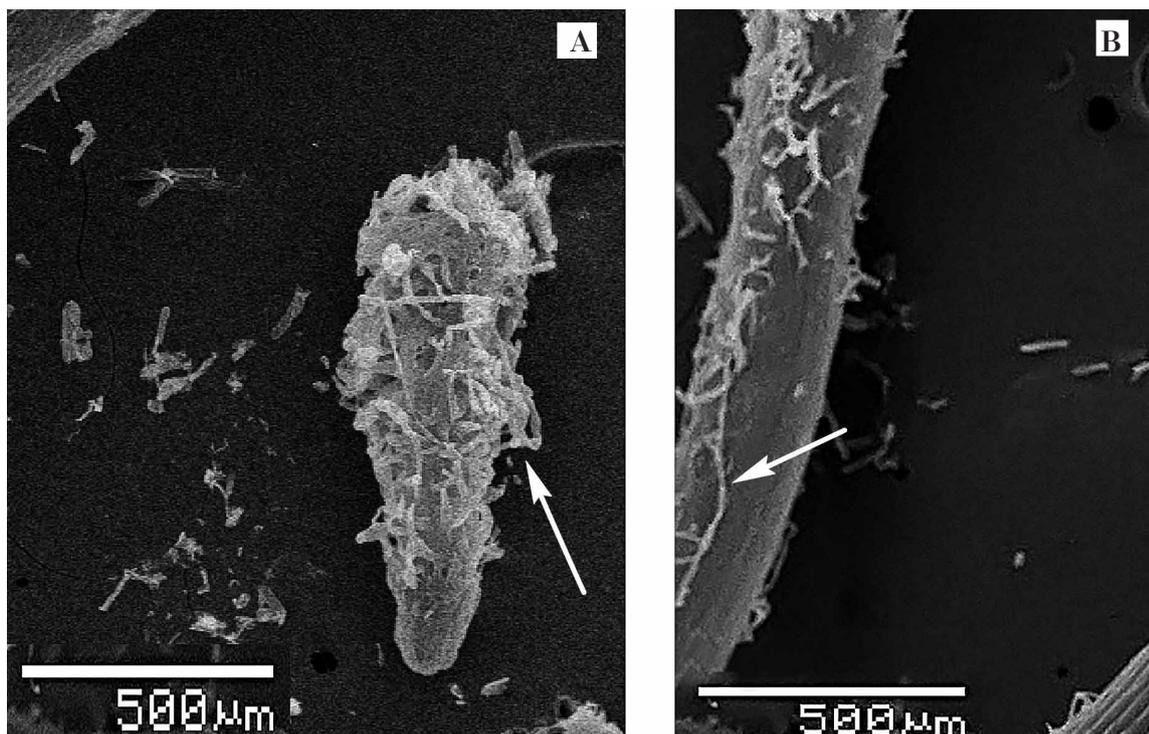


Рис. 4. Колонизация корней меристемных пробирочных растений картофеля Пранса мицелием *S. flavogriseus* ТК-5 (А) и *S. anulatus* Т-2-20 (В). Возраст растений – 60 сут
Fig. 4. Colonization of potato plant roots with mycelium *S. flavogriseus* ТК-5 (А) and *S. anulatus* Т-2-20 (В). Age of plants is 60 days

тения картофеля достигли возраста 60 сут (рис. 3).

По результатам посева, наиболее высокую концентрацию пропагул наблюдали в корнях ((7,81±1,49) · 10⁶ и (1,68±0,85) · 10⁷ КОЕ/г) и в листьях – (1,35±0,37) · 10⁶ и (1,6±1,02) · 10⁵ КОЕ/г соответственно для Т-2-20 и ТК-5). Плотность заселения стеблей была достоверно ниже – от (4,9±1,21) · 10² КОЕ/г у штамма ТК-5 до (1,06±0,13) · 10⁴ КОЕ/г у штамма Т-2-20. При этом плотность заселения корней и листьев штаммом Т-2-20 различалась в пределах одного порядка, а для продуцирующего лектины штамма ТК-5 различия достигали двух порядков. Приведённые количественные характеристики по колонизации картофеля стрептомицетами получены после проведения процедуры предварительной отмывки поверхности растений водой, что свидетельствует о способности мицелиальных бактерий проникать внутрь растительных тканей, а не только распространяться на их поверхности.

Подвергнутые инокуляции растения внешне не отличались от контрольных. Сравнение контрольных и колонизированных растений по морфометрическим показателям показало, что негативного влияния на рост и развитие картофеля *in vitro* заселение растений мицелиальными прокариотами не оказывает (табл. 2).

Между контрольными и колонизированными растениями также не было достоверных различий при последующем их выращивании в почве. В качестве тенденции отмечено, что инокуляция картофеля *S. anulatus* Т-2-20 способствовала в первом клубневом поколении увеличению в два раза доли средней фракции (20–40 мм) при одновременном снижении на 18% доли мелкой фракции (менее 20 мм) в сравнении с контролем (табл. 3).

Таким образом, изучение колонизирующей активности мицелиальных бактерий *S. flavogriseus* ТК-5 и *S. anulatus* Т-2-20, выделенных соответственно из ризосферы табака

Таблица 2 / Table 2

Морфометрические показатели растений картофеля *in vitro*
Morphometric parameters of the meristem potato plants *in vitro*

Вариант Variant	Длительность культивирования, сут Duration of cultivation, days	Длина стебля, мм Length stem, mm	Количество междоузлий, шт Number of internodes, pcs	Количество листьев, шт Number of leaves, pcs
Контроль/control	20	33,0±14,1	2,90±1,19	3,30±1,75
ТК-5		22,0±11,8	1,60±0,88	1,80±1,09
Т-2-20		35,0±11,9	2,50±0,92	3,30±1,03
Контроль/control	30	49,0±22,0	3,60±1,76	5,40±2,16
ТК-5		47,0±16,2	3,30±0,82	5,20±1,17
Т-2-20		52,0±14,7	3,70±0,73	5,10±1,29
Контроль/control	60	66,0±20,1	4,10±1,10	10,60±3,03
ТК-5		67,0±10,2	6,00±1,15	11,00±1,79
Т-2-20		77,0±12,1	6,30±1,11	12,50±1,61

Таблица 3 / Table 3

Показатели продуктивности картофеля Пранса в первом клубневом поколении
Potato productivity indicators in the first generation of tubers

Вариант Variant	Количество клубней с растения, шт Number of tubers per plant, pcs	Масса клубней с растения, г* Weight of tubers from plant, g*	Количество миникубней по фракциям, % Number of mini tubers by fractions, %		
			≤ 20 мм	20–40 мм	≥ 40 мм
Контроль / control	6,7±2,3	<u>19,2</u> 0,5–78,5	65	20	15
ТК-5	7,0±2,4	<u>16,8</u> 1,0–58,6	67	21	12
Т-2-20	5,0±1,5	<u>26,2</u> 1,6–105,4	47	40	13

Примечание: *Числитель – среднее значение, знаменатель – минимальное и максимальное значения.
Note: *Numerator – average value, denominator – minimum and maximum values.

и томата, показало их способность успешно заселять поверхность различных органов и проникать в ткани меристемных растений картофеля. При искусственной бактеризации популяционная плотность мицелиальных прокариот в надземных органах картофеля может достигать 10^2 – 10^6 КОЕ/г, а в корнях – 10^6 – 10^7 КОЕ/г, в зависимости от штамма.

Продуцирующий ауксины и лектины штамм ТК-5 отличался выраженной приуроченностью к корневым тканям, тогда как антагонистически активный штамм Т-2-20 обнаруживался в растениях картофеля относительно равномерно: различия в плотности заселения корней и листьев не выходили за рамки одного порядка. Сравнительный анализ морфометрических показателей растений показал, что колонизация стрептомицетами не оказала негативного влияния на рост и развитие картофеля *in vitro* и *ex vitro*. Полученные результаты дают основание к использованию изученных штаммов *S. flavogriseus* ТК-5 и *S. anulatus* Т-2-20 для искусственной бактеризации растений других видов семейства *Solanaceae*, а также при создании экологически безопасных биопрепаратов и агротехнологий.

Работа выполнена в рамках государственного задания по теме «Изучить потенциал полифункционального действия мицелиальных микроорганизмов в региональных типах почв с целью создания новых препаратов для повышения адаптивности и экологической безопасности растениеводства и защиты окружающей среды от загрязнений» № 0767-2018-0012.

References

1. Novikova I.I. The biological diversity of microorganisms is the basis for the creation of new multifunctional biological products for phytosanitary optimization of agroecosystems // Vestnik zashchity rasteniy. 2016. V. 83. No. 3. P. 120–122 (in Russian).
2. Strohl W.R. Antimicrobials // Microbial diversity and bioprocessing / Ed. A.T. Bull. American Society for Microbiology, Washington DC, 2004. P. 336–355.
3. Challis G.L., Hopwood D.A. Synergy and contingency as driving forces for the evolution of multiple secondary metabolite production by *Streptomyces* species // Proceedings of the National Academy of Sciences. 2003. V. 100. No. suppl. 2. P. 14555–14561.
4. Doroghazi J.R., Metcalf W.W. Comparative genomics of actinomycetes with a focus on natural product biosynthetic genes // BMC genomics. 2013. V. 14. No. 1. P. 611.
5. Weber T., Blin K., Duddela S., Krug D., Kim H.U., Brucoleri R., Breitling R. antiSMASH 3.0-a comprehensive resource for the genome mining of biosynthetic gene clusters // Nucleic acids research. 2015. V. 43 (W1). P. W237–W243.
6. Shrivastava P., Kumar R. Actinobacteria: Eco-friendly candidates for control of plant diseases in a sustainable Manner. New and future developments in microbial biotechnology and bioengineering. 2018. P. 79–91.
7. Yegorov N.S. Fundamentals of the theory of antibiotics. Moskva: Nauka, 2004. 528 p. (in Russian).
8. Libbert E., Risch H. Interactions between plants and epiphytic bacteria regarding their auxin metabolism // Physiol. Plantarum. 1969. V. 22. P. 51–58.
9. Nazarova Ya.I., Bakulina A.V., Bezmeltseva O.M., Sergushkina M.I., Shirokikh I.G. Hemagglutination ability of streptomycetes from the rhizosphere of some representatives of Solanacea // Plants and Microorganisms: Biotechnology of the Future: Mater. mezhdunar. nauchn. konf. PLAMIC2018. Ufa, 2018. P. 206 (in Russian).
10. Murashige Y., Skoog F. A revised medium for rapid growth and bioassay with tobacco tissue culture // Physiol. Plant. 1962. No. 3. P. 473–497.
11. Polyanskaya L.M. Microbial succession in soil: Author. Diss ... dr. biol. sciences. Moskva: MGU, 1996. 96 p. (in Russian).
12. Belyavskaya L.A., Kovalenko E.A., Kozyritskaya V.E., Iutinskaya G.A. Lectins of soil streptomycetes – phytopathogen antagonists // Conference proceedings. II All-Russian Conference. Saratov: Racurs LLC, 2014. P. 102 (in Russian).
13. Valagurova H.V., Iutinskaya G.A., Kozyritskaya V.E., Ivanova N.I., Andreyuk K.I. Heavy metals effect on the streptomycete association of grey podzolic soil // Microbiol. Zh. 1996. V. 58 (2). P. 16–22.
14. Gauze G.F., Preobrazhenskaya T.P., Sveshnikova M.A., Terekhova L.P., Maksimova T.S. Key to actinomycetes. Genera: *Sreptomycetes*, *Streptoverticillium*, *Chainia*. Moskva: Nauka, 1983. 248 p. (in Russian).
15. Lanoot B., Vancanneyt M., Van Schoor A., Liu Z., Swings J. Reclassification of *Streptomyces nigrifaciens* as a later synonym of *Streptomyces flavovirens*; *Streptomyces citrofluorescens*, *Streptomyces chrysomallus* subsp. *chrysomallus* and *Streptomyces fluorecens* as later synonyms of *Streptomyces anulatus*; *Streptomyces chibaensis* as a later synonym of *Streptomyces corchorusii*; *Streptomyces flaviscleroticus* as a later synonym of *Streptomyces minutiscleroticus*; and *Streptomyces lipmanii*, *Streptomyces griseus* subsp. alpha, *Streptomyces griseus* subsp. *cretosus* and // International journal of systematic and evolutionary microbiology. 2005. V. 55 (2). P. 729–731.
16. Saleh O., Flinspach K., Westrich L., Kulik A., Gust B., Fiedler H.P., Heide L. Mutational analysis of a phenazine biosynthetic gene cluster in *Streptomyces anulatus* 9663 // Beilstein Journal of Organic Chemistry. 2012. V. 8. P. 501–513. doi: 10.3762/bjoc.8.57

Alternative energy: methanol, ethanol and alcohol esters of rapeseed oil as eco-friendly biofuel

© 2019. A. Marchuk¹ ORCID: 0000-0002-6172-3013,
V. A. Likhanov² ORCID: 0000-0003-3033-7176, O. P. Lopatin² ORCID: 0000-0002-0806-6878,
¹University of Natural Sciences,
13, Akademickya St., Lublin, the Republic of Poland, 20-950,
²Vyatka State Agricultural Academy,
133, Oktyabrskiy Prospect, Kirov, Russia, 610017,
e-mail: Andrzej.marczuk@up.lublin.pl, nirs_vsaa@mail.ru

The authors of the article explain the necessity of using eco-friendly biofuel for motor vehicles. The possibilities and ways of using biofuel in motor vehicles on the basis of alcohols (methanol, ethanol) and methyl ester of rapeseed oil are analyzed. The physical and chemical properties of these biofuel types are presented. In order to develop, determine and optimize the composition of eco-friendly biofuel for motor diesel engines, the authors have tested them during their work in methanol, ethanol-fuel emulsions and methyl ester of rapeseed oil. It has been experimentally established that the use of eco-friendly fuel in transport diesel engines is possible in the form of alcohol-fuel emulsions (alcohol (methanol or ethanol) is 25.0%, detergent-dispersant additive succinimide C-5A is 0.5%, water is 7.0%, diesel fuel is 67.5%) and in the form of separate supply of methanol (88.0%) and methyl ester of rapeseed oil (12.0%).

The experimental research of motor diesel engines working on eco-friendly biofuel types of the above mentioned compositions has been carried out and the perspective decision of improving their environmental performance has been explained. When the diesel engine is operating on a methanol-fuel emulsion, the reduction in the pollutant content in the exhaust gases takes place: nitrogen oxides reduces by 41.3%, carbon soot reduces by 85.5%, carbon dioxide reduces by 6.7%, carbon monoxide reduces by 45.0%. When working on ethanol-fuel emulsion there is a decrease in nitrogen oxides by 50.2%, in carbon soot by 80.7%, in carbon dioxide by 23.8%, in carbon monoxide by 25.0%. And when working on methanol and rapeseed oil methyl ester there is a decrease in nitrogen oxides by 47.4%, in carbon soot by 90.4%, in carbon monoxide by 44.8%.

Keywords: biofuel, methanol, ethanol, emulsion, rapeseed oil, diesel engine.

УДК 631.4

Альтернативная энергетика: метанол, этанол и спиртовые эфиры рапсового масла – экологичное биотопливо

© 2019. А. Марчук¹, д. т. н., профессор, В. А. Лиханов², д. т. н., профессор,
О. П. Лопатин², к. т. н., доцент,
¹Университет естественных наук,
20-950, Республика Польша, г. Люблин, ул. Академическая, д. 13,
²Вятская государственная сельскохозяйственная академия,
610017, Россия, г. Киров, Октябрьский пр., д. 133,
e-mail: nirs_vsaa@mail.ru

Обоснована необходимость использования экологичного биотоплива для автотранспортных средств. Проанализированы возможности и пути использования в них биотоплива на основе спиртов (метанола, этанола) и метилового эфира рапсового масла. Представлены физико-химические свойства указанных видов биотоплива. В целях разработки, определения и оптимизации состава экологичных видов биотоплива для автотранспортных дизелей проведены их испытания при работе на метаноле-, этаноле-топливных эмульсиях и метиловом эфире рапсового масла. Экспериментальным путём установлено, что применение экологичного топлива в транспортных дизелях возможно в виде спирто-топливных эмульсий (спирт (метанол или этанол) – 25,0%, моюще-диспергирующая присадка сукцинимид С-5А – 0,5%, вода – 7,0%, дизельное топливо – 67,5%) и в виде отдельной подачи метанола (88,0%) и метилового эфира рапсового масла (12,0%).

Проведены экспериментальные исследования автотранспортных дизелей на экологичных видах биотоплива вышеуказанных составов и обосновано перспективное решение улучшения их экологических показателей. При

работе дизеля на метаноле-топливной эмульсии происходит снижение содержания в выхлопных газах оксидов азота на 41,3%, сажи – в 6,9 раза, диоксида углерода – на 6,7%, оксида углерода – на 45,0%; при работе на этаноле-топливной эмульсии – оксидов азота на 50,2%, сажи – в 5,2 раза, диоксида углерода – на 23,8%, оксида углерода – на 25,0%; при работе на метаноле и метиловом эфире рапсового масла оксидов азота – на 47,4%, сажи – в 10,4 раза, оксида углерода – на 44,8%.

Ключевые слова: биотопливо, метанол, этанол, эмульсия, рапсовое масло, дизель.

Nowadays, the constant environmental degradation in the world, especially in large settlements, makes developed countries introduce regulatory restrictions on toxicity and smokiness emissions from vehicles. For example, in Russia, motor transport accounts for 90% of the total amount of harmful substances coming from all kinds of transport. Therefore, the problems of environmental safety of motor transport are an integral part of the country’s environmental safety. The significance and severity of this problem is growing every year [1–3].

Each car emits more than 200 different components with the exhaust gases into the atmosphere. At the same time, manufacturers put the environmental compatibility of the exhaust gases into the construction of vehicles at the design stage, and it should not deteriorate while using the vehicles. Therefore, it is not difficult to assume that the future is in the environmentally friendly cars working on alternative petroleum fuels [4–6].

Nowadays the most studied and promising alcohols for using in motor vehicles are monohydric primary alcohols – methanol (CH₃OH) and ethanol (C₂H₅OH). Among the positive methanol

properties for its use in motor diesel engines, one can note the presence of oxygen in its molecule, which makes it possible to use methanol as oxygenates (oxygen-containing components), that contribute to reducing harmful emissions of carbon soot and CO in its combustion products [7–10].

The use of these alcohols as an alternative biofuel for motor vehicles became possible as a result of obtaining them in an accessible way from agricultural and food waste, from gaseous fuels. But the more important reason for using methanol and ethanol is to reduce emissions of toxic components in the motor vehicle exhaust gases (Fig. 1) [11].

When using alcohols as fuel for motor diesel engines, the emissions of carbon soot particles and nitrogen oxides can be significantly reduced. Alcohol with its simpler structure and insignificant molecular size is one of the determining factors for a more clean burning of fuel [12, 13].

From all the existing alternative fuels, biofuels and their mixtures with diesel fuel in various proportions (vegetable and mineral mixtures) are promising, and the agricultural enterprises that consume mainly petroleum products as fuel

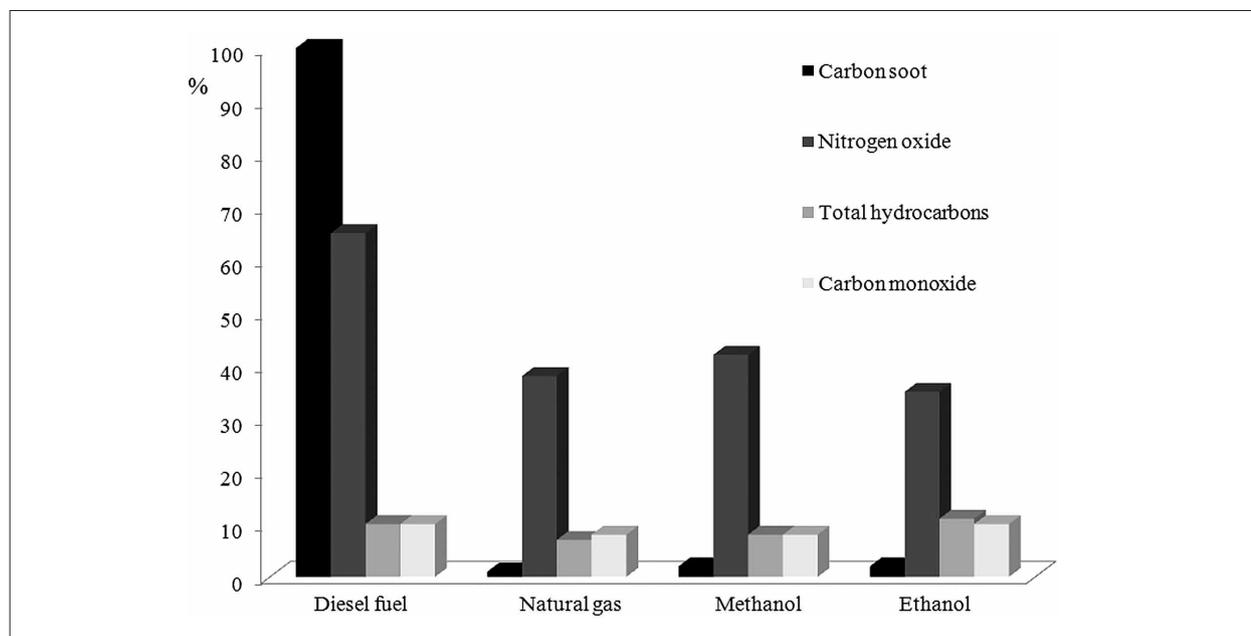


Fig. 1. Relative content of harmful substances in the exhaust gases of motor transport operating on different alternative fuels, % (for 100% diesel fuel on carbon soot is accepted) [11]

Table 1

Physical and chemical characteristics of biofuel and diesel fuel [11]

Indicator	Methanol	Rapeseed oil	Methyl ester of rapeseed oil	Diesel fuel
Density, 20 °C, kg/m ³	795	877	860–900	863
Kinematic viscosity, 20 °C, mm ² /s	0.6	80	12	3.0–6.0
The lower calorific value, MJ/m ³	19.7	36.7	37.2	42.5
Cetane number	3	44	51	45

are now capable of producing eco-friendly renewable biofuel both for urban vehicles and for their machinery [14, 15].

The vegetable oil of any kind is a mixture of triglycerides, i.e. esters, connected to a molecule of glycerin. Glycerin, in turn, also imparts viscosity and density to vegetable oil. Thus, the main task in obtaining biofuel is the removal of glycerin by replacing it with alcohol. At the moment, alternative fuels from rapeseed oil are used in natural form, in the form of methyl and dimethyl ester of rapeseed oil [16, 17].

The methyl ester of rapeseed oil can be characterized by a lower level of coking the motor diesel engines parts than the ethyl ester of rapeseed oil because of its lower viscosity and molecular weight. In addition, methyl esters are better preserved. The advantages of ethyl esters include reduction of smokiness and temperature of exhaust gases and less aggressiveness to engine parts. In the further production process, ethyl esters are less harmful, but in the purification of biofuels to remove excess alcohol there are minor complications, since ethyl alcohol forms the stable aqueous emulsion. In this regard, because of the lower cost of methanol, the production of methyl ester of rapeseed oil is more profitable. Therefore, the methyl ester of rapeseed oil, as an alternative eco-friendly biofuel, is becoming the most popular in Europe [18].

Thus, methanol, ethanol and rapeseed oil are the most suitable for biofuel production, and due to their availability and cost, they can be used as the basis or a component of eco-friendly biofuel for motor vehicles.

The aim of this work is to use eco-friendly biofuels in diesel engines to improve their environmental performance and to save the oil motor fuel.

Objects and methods of research

Compared with other alternative fuels, the cost of methanol is low, and one of its drawbacks is the high heat of evaporation at low boiling point (1104 kJ/kg vs. 250 kJ/kg for regular

diesel fuel). This leads to cooling the air charge due to the evaporation of alcohol at low cetane numbers and high self-ignition temperatures, which eventually causes bad ignition in the combustion chamber of the diesel engine. Therefore, the ignition of methanol under such conditions is possible with the help of additionally installed sources of ignition, the supply of methanol at the intake or the use of various catalysts that contribute to reducing the ignition temperature of methanol, and also accelerate the process of combustion reactions. Another effective method of igniting methanol in the combustion chamber of a diesel engine can be the supply of the primer portion of the standard diesel fuel to the combustion chamber. In order to improve the ignition of alcohols, dual fuel-delivery systems are used, which, simultaneously with the supply of alcohol (the main biofuel), make the input of the primer portion of diesel fuel [19].

The required physical and chemical properties of alternative biofuels determine the use of appropriate technologies that can provide operational, economic and environmental indicators. In the production of biofuel, various types of vegetable oils, such as rapeseed, linseed, sunflower, palm oil, etc., are used. At the same time, the biofuel obtained from different vegetable oils has a number of distinctive physical and chemical characteristics. Such characteristics include: the lower calorific value, viscosity, density, filterability, pour point, coking capacity, cetane number, etc. (Table 1) [11].

Thus, the presented data from Table 1 demonstrate the similarity of the biofuel parameters with diesel fuel in terms of density and divergence in kinematic viscosity, lower calorific value and cetane number. Naturally, this fact suggests that it is difficult to apply one type of biofuel in its pure form in diesel engines. Therefore, it has been decided to use biofuel in the form of alcohol-fuel emulsions and methyl ester of rapeseed oil in the combination with methanol, which allows to approximate the values of physical and chemical properties of biofuel to conventional diesel fuel [14, 20].

To conduct the research, at the Department of Heat Engines, Vehicles and Tractors of the Vyatka State Agricultural Academy we have set up the experimental base in the research laboratory of testing motor-vehicle diesel engines. The experimental base includes the electro-brake testing bench SAK-N670 which has a balanced pendulum mechanism, and motor vehicles and the measuring equipment installed on it. The emulsions have been prepared by a homogenizer MPW-302 at a shaft rotation speed of 2000 min^{-1} . The microscopic examination of the emulsions has been carried out with the micrometer MIC-MED 1. Sampling of the exhaust gases has been carried out by the gas samplers of the automatic system of gas analysis (ASGA-T) installed in the diesel exhaust pipeline. The smokiness of the exhaust gases has been measured with the use of a "BOSCH-EFAW-68A" opacimeter. For the input of alternative eco-friendly biofuels, the motor diesel has been equipped with a dual fuel-delivery system. In this case, the ignition of methanol has been carried out by feeding a primer portion of methyl ester of rapeseed oil. This scheme of fuel input completely eliminates the need of using petroleum diesel fuel.

Results and discussion

To determine the composition of alcohol-fuel emulsions, we have performed the microscopic examination of the prepared emulsion samples and the samples with the flocculation process started (Fig. 2).

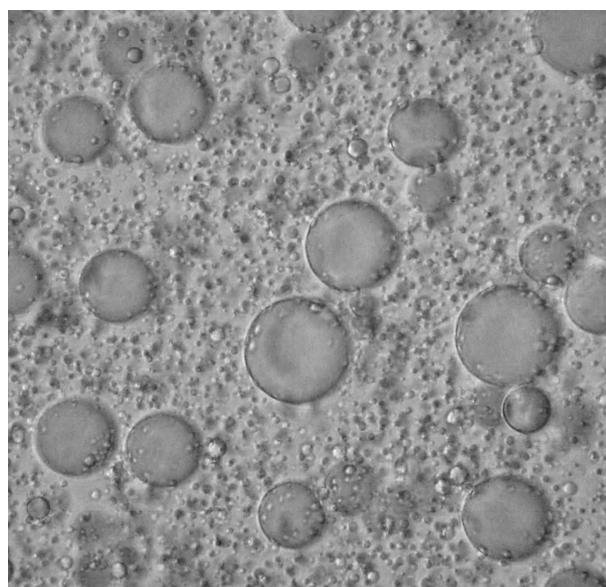
As you can see (Fig. 2a), the sample has a uniform composition with respect to the particle size, and after some time the particles merge into larger aggregates, which determines the flocculation process (Fig. 2b). Thus, the prepared alcoholic biofuel has a "margin of safety during the time for the sedimentation process (stratification of dispersed systems under the action of gravity with the separation of dispersed phase in the precipitate form), since this does not yet mean the emulsion separation into two phases. During this time, the sample of alcoholic emulsion can take the original composition due to slight shaking (or the engine vibration).

During the tests of the motor diesel engine on alcoholic emulsions, emulsions with the following composition have been used: alcohol (methanol or ethanol) is 25.0%, detergent-dispersant additive succinimide is C-5A – 0.5%, water is 7.0%, diesel fuel is 67.5%. For the motor diesel engine, the eco-friendly biofuel has also been developed, it consisted of methanol (88.0%) and methyl ester of rapeseed oil (12.0%) [11, 20].

Figure 3 shows the dependence on the environmental performance load of the motor diesel engine operating on alcoholic emulsions at the nominal speed mode ($n = 2200 \text{ min}^{-1}$). Analyzing the graphs of toxicity and smokiness of the diesel exhaust gases during its work on alcoholic emulsions, it can be seen that the reduction in content of NO_x , carbon soot C and CO_2 takes place throughout the entire range of studies, while the CO content decreases only at the maximum effective load p_e , and C_xH_y increases.



a



b

Fig. 2. Microscopic image of ethanol-fuel emulsion in the microscope (the magnification is 100 times): a – immediately after preparation; b – at the beginning of the flocculation process

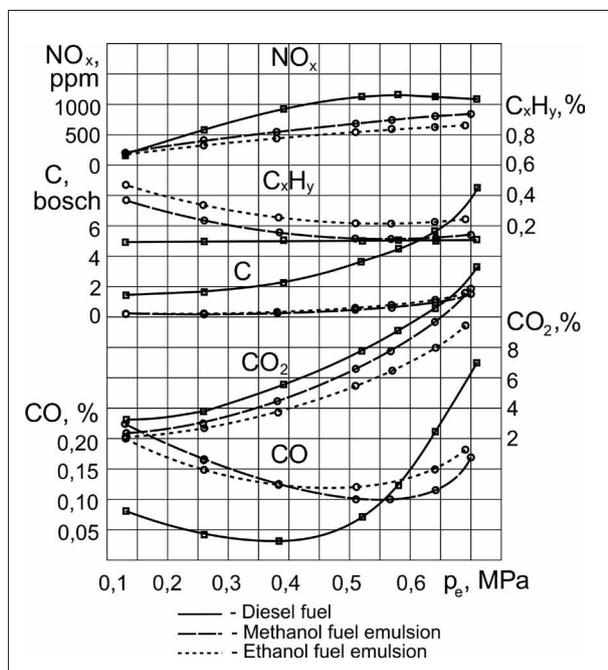


Fig. 3. Changes in the environmental performance of the transport diesel (4F 11.0/12.5) depending on the load change (p_e)

The results of studies of the environmental performance of the motor diesel 4F 11.0/12.5 are presented in Table 2.

So, from table 2 you can see that for the nominal load ($p_e = 0.64$ MPa) and the nominal crankshaft speed ($n = 2200$ min⁻¹), the reduction for carbon soot is 85.5 and 80.7% for methanol-fuel emulsion and ethanol-fuel emulsion, respectively.

Figure 4 shows the dependence of the emissions NO_x of the diesel engine operating on methanol and methyl ester of rapeseed oil with a dual fuel-delivery system on various combinations of the adjusting angles of fuel supply timing at nominal operating conditions ($n = 1800$ min⁻¹, $p_e = 0.588$ MPa).

As you can see from figure 4, at the optimum adjusting angle of the methanol supply (Θ_{Met}) equal to 34° of crankshaft rotation and at similar

combinations of the advance angles of the methyl ester of rapeseed oil, the NO_x values decrease and they are 655, 401, 316 and 243 ppm, respectively.

Conclusion

The authors of the article have given a promising solution for improving the environmental performance of the motor diesel engines, working on the biofuel of the following composition:

1. Methanol-fuel emulsion: methanol is 25.0%, detergent-dispersant additive succinimide C-5A is 0.5%, water is 7.0%, diesel fuel is 67.5%.

2. Ethanol-fuel emulsion: ethanol is 25.0%, detergent-dispersant additive succinimide C-5A is 0.5%, water is 7.0%, diesel fuel is 67.5%.

3. Methanol is 88.0%, methyl ester of rapeseed oil is 12.0%.

When a methanol-fuel emulsion was used as the fuel for the diesel engine, the pollutant content in the exhaust gases has been reduced: nitrogen oxides by 41.3%, carbon soot by 85.5%, carbon dioxide by 6.7%, carbon monoxide by 45.0%. When working on ethanol-fuel emulsion there is a decrease in nitrogen oxides by 50.2%, in carbon soot by 80.7%, in carbon dioxide by 23.8%, in carbon monoxide by 25.0%. When working on methanol and rapeseed oil methyl ester there is a decrease in nitrogen oxides by 47.4%, in carbon soot by 90.4%, in carbon monoxide by 44.8%.

The work of the diesel engine on the alcohol-fuel emulsion helps to save oil motor fuel by 32.5%; and when it works on methanol and rapeseed oil methyl ester, the savings are 100%.

References

- Solis J.L., Alejo L., Berkemar A.L., Kiros Y. Biodiesel from rapeseed oil (*Brassica napus*) by supported Li_2O and MgO // International Journal of Energy and Environmental Engineering. 2017. V. 8. No. 1. P. 9–23.
- Karthikeyan S., Elango A., Prathima A. The effect of cerium oxide additive on the performance and emission

Table 2

The results of studies of the environmental performance of the motor diesel 4F 11.0/12.5 ($n = 2200$ min⁻¹, $p_e = 0.64$ MPa)

Fuel	Indicators			
	NO_x , ppm	C, Bosch	CO_2 , %	CO, %
Diesel fuel	1320	6.2	10.5	0.20
Methanol fuel emulsion	775 (decrease by 41.3%)	0.9 (decrease by 85.5%)	9.8 (decrease by 6.7%)	0.11 (decrease by 45.0%)
Ethanol fuel emulsion	657 (decrease by 50.2%)	1.2 (decrease by 80.7%)	8.0 (decrease by 23.8%)	0.15 (decrease by 25.0%)

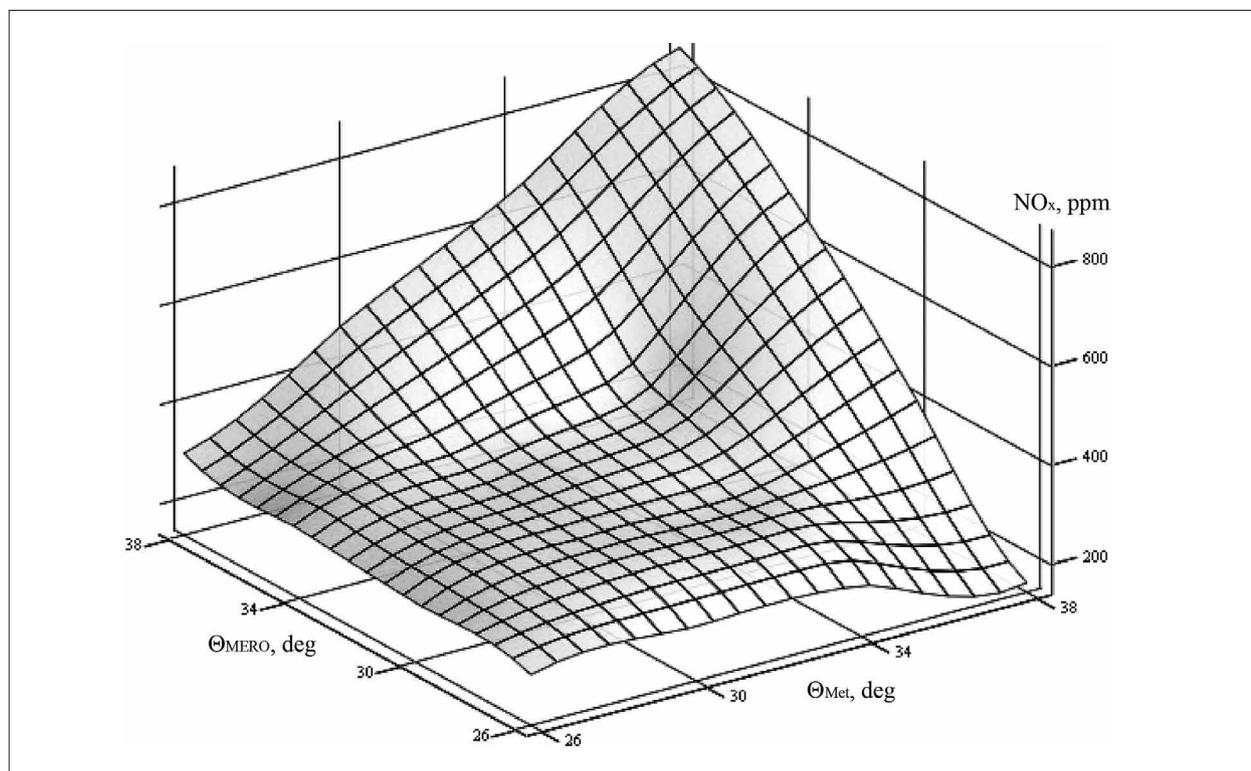


Fig. 4. The dependence of the exhaust gases emissions NO_x of the diesel engine (2F 10.5/12.0) working on methanol and methyl ester of rapeseed oil on the adjusting angles of fuel supply (Θ_{Met} – methanol; Θ_{MERO} – methyl ester of rapeseed oil)

characteristics of a ci engine operated with rice bran Biodiesel and its blends // *International Journal of Green Energy*. 2016. V. 13. No. 3. P. 267–273.

3. Markov V.A., Loboda S.S., Kamaltdinov V.G. Optimization of diesel Fuel and corn oil mixtures composition // *Procedia Engineering*. 2016. V. 150. P. 225–234. doi: 10.1016/j.proeng.0.6.751.

4. Jeevahan J., Mageshwaran G., Joseph G.B., Raj R.B.D., Kannan R.T. Various strategies for reducing NO_x emissions of Biodiesel Fuel used in conventional Diesel engines: a review // *Chemical Engineering Communications*. 2017. V. 204. No. 10. P. 1202–1223.

5. Pradelle F., Braga S.L., de Aguiar Martins A.R.F., Turkovics F., Pradelle R.N.C. Stabilization of Diesel-biodiesel-ethanol (DBE) blends: formulation of an additive from renewable sources // *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*. 2017. V. 39. No. 9. P. 3277–3293.

6. Banerjee A., Varshney D., Kumar S., Chaudhary P., Gupta V.K. Biodiesel production from castor oil: an modeling and kinetic parameter estimation // *International Journal of Industrial Chemistry*. 2017. V. 8. No. 3. P. 253–262.

7. Sales E.A., Ghirardi M.L., Jorquera O. Sub-critical ethylic Biodiesel production from wet animal fat and vegetable oils: a net Energy ratio analysis // *Energy Conversion and Management*. 2017. V. 141. P. 216–223.

8. Imdadul H.K., Zulkifli N.W.M., Masjuki H.H., Kalam M.A., Rashed M.M., Rashedul H.K., Alwi A., Kamruzzaman M. Experimental assessment of non-edible candlenut Biodiesel and its blend characteristics as diesel engine Fuel // *Environmental Science and Pollution Research*. 2017. V. 24. No. 3. P. 2350–2363.

9. Aldhaidhawi M., Chiriac R., Badescu V. Ignition delay, Combustion and emission characteristics of Diesel engine fueled with rapeseed Biodiesel – a literature review // *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2017. V. 73. P. 178–186.

10. Santana H.S., Tortola D.S., Taranto O.P., Silva J.L. Biodiesel synthesis in micromixer with static elements // *Energy Conversion and Management*. 2017. V. 141. P. 28–39.

11. Likhanov V.A., Kopchikov V.N., Fominykh A.V. Application of methanol and methyl ether of rapeseed oil for diesel operation 2F 10.5/12.0. Kirov: Vyatskaya GSKhA, 2017. 226 p. (in Russian).

12. Das H.P., Sailu C., Neeharika T.S.V.R., Srikanth V., Rani K.N.P., Kumar T.P. Kinetics of amidation of free fatty acids in jatropha oil as a prerequisite for Biodiesel production // *Fuel*. 2017. V. 196. P. 169–177.

13. Sumprasit N., Wagle N., Glanpracha N., Annachatre A.P. Biodiesel and biogas recovery from spirulina platensis // *International Biodeterioration and Biodegradation*. 2017. V. 119. P. 196–204.

14. Kumar N. Oxidative stability of Biodiesel: causes, effects and prevention // *Fuel*. 2017. V. 190. P. 328–350.

15. Tran D.-T., Chang J.-S., Lee D.-J. Recent insights into continuous-flow Biodiesel production via catalytic and non-catalytic transesterification processes // *Applied Energy*. 2017. V. 185. P. 376–409.

16. Liu J., Nan Y., Tavlarides L.L. Continuous production of Ethanol-based Biodiesel under subcritical conditions employing trace amount of homogeneous catalysts // *Fuel*. 2017. V. 193. P. 187–196.

17. Bogatishcheva N.S., Faizullin M.Z., Nikitin E.D. Heat capacities and thermal diffusivities of n-alkane acid ethyl esters-biodiesel Fuel components // *Russian Journal of Physical Chemistry A*. 2017. V. 91. No. 9. P. 1647–1653.

18. Lankoff A., Kowalska M., Lisowska H., Wegierek-Ciuk A., Brzoska K., Kruszewski M., Czarnocka J., Mruk R.,

Øvrevik J., Zuberek M. A comparative analysis of in vitro toxicity of diesel exhaust particles from combustion of 1st- and 2nd-generation biodiesel fuels in relation to their physicochemical properties – the fuel health project // *Environmental Science and Pollution Research*. 2017. V. 24. No. 23. P. 19357–19374.

19. Sakthivel G. Prediction of ci engine performance, emission and Combustion characteristics using fish oil as a biodiesel at different injection timing using fuzzy logic // *Fuel*. 2016. V. 183. P. 214–229.

20. Likhanov V.A., Lopatin O.P. Use of natural gas, methanol, and ethanol fuel emulsions as environmentally friendly energy carriers for mobile heat power plants // *Thermal Engineering*. 2017. V. 64. No. 12. P. 935–944.

Переработка отходов фторопластов в ультрадисперсный политетрафторэтилен для получения смазок и защитных покрытий

© 2019. С. Л. Фукс, к. т. н., с. н. с., С. В. Хитрин, д. х. н., профессор,
С. В. Девятерикова, к. т. н., доцент,
Вятский государственный университет,
610000, Россия, г. Киров, ул. Московская, д. 36,
e-mail: usr01730@vyatsu.ru, tzb_fuks@vyatsu.ru, ikhitrina@mail.ru

Образование до 50% отходов при производстве и потреблении фторопластов приводит к накоплению в окружающей среде политетрафторэтилена (ПТФЭ), неспособного к безопасной деструкции в природных условиях. Чрезвычайно актуальна эффективная переработка отходов ПТФЭ без выделения опасных веществ. В работе определены состав и структура летучих и твёрдых высокомолекулярных продуктов, образующихся при переработке отходов ПТФЭ методами предложенной нами термодеструкции с исчерпывающим фторированием (Ф-4 и Ф-4Д) и гидротермальной деструкции (Ф-4). Летучая фаза, выделяющаяся при переработке отходов Ф-4Д методом термодеструкции с исчерпывающим фторированием трифторидом кобальта, состоит из перфторпарафинов нормального строения с молекулярной массой свыше 338. В основном, образуются твёрдые нормального строения перфторалканы с высокой молекулярной массой (C_{10} – C_{20} и более). Твёрдая фракция представлена сфероидальными моночастицами деструктурированных макромолекул ПТФЭ. Частицы порошка ультрадисперсного фторопласта УПТФЭ (Ф-4Д), полученного непосредственно из реактора, состоят из пластинок с размером частиц 70–450 нм. Частицы сухого остатка взвеси УПТФЭ в перфтордекалине приобретают вид пористых агломератов сфероидальной формы, имеющей поры размером 50–300 нм. Размеры сфероидов взвеси находятся в диапазоне 220–5500 нм. Частицы порошка УПТФЭ (Ф-4), полученного из реактора, и взвеси УПТФЭ в перфтордекалине, состоят из пластин, свёрнутых в сфероиды с диагональю 433–1132 нм. Частицы УПТФЭ, полученного методом гидротермальной деструкции, имеют беспористую сфероидальную форму с диагональю 400–3000 нм. Исследованы фторированные смазки на основе сополимера тетрафторэтилена и этилена, ПТФЭ, УПТФЭ, полученного термодеструкцией с исчерпывающим фторированием трифторидом кобальта, УПТФЭ, полученного деструкцией ПТФЭ гидротермальным способом. УПТФЭ, полученный методом термодеструкции с исчерпывающим фторированием из отходов фторопласта Ф-4Д, обеспечивает минимальный коэффициент трения качения. Изучено образование композиционных защитных покрытий металлов, содержащих УПТФЭ, толщиной до 80 мкм.

Ключевые слова: фторопласт, ультрадисперсный, термическая деструкция политетрафторэтилена с исчерпывающим фторированием, гидротермическая деструкция, смазки, защитные покрытия.

Processing of fluoroplast waste to ultradisperse polytetrafluoroethylene for obtaining lubricants and protective coatings

© 2019. S. L. Fuks ORCID: 0000-0002-9236-2944, S. V. Khitrin ORCID: 0000-0001-6874-6018
S. V. Devyaterikova ORCID: 0000-0003-1863-1209
Vyatka State University,
36, Moskovskaya St., Kirov, Russia, 610000,
e-mail: usr01730@vyatsu.ru, tzb_fuks@vyatsu.ru, ikhitrina@mail.ru

The formation of up to 50% of waste in the production and consumption of fluoroplastics leads to the accumulation of polytetrafluoroethylene (PTFE) in the environment, which is not capable of safe destruction under natural conditions. Efficient recycling of PTFE waste without the release of hazardous substances is extremely important. In this paper, the composition and structure of volatile and solid high-molecular products formed during the processing of PTFE waste by the methods of thermal decomposition proposed by us with exhaustive fluoridation (F-4 and F-4D) and hydrothermal destruction (F-4) are determined. The volatile phase released during the processing of waste F-4D by thermal decomposition with exhaustive fluoridation with cobalt trifluoride consists of normal perfluoroparaffins with molecular weight above 338. Mostly, solid normal structure perfluoroalkanes with high molecular weight (C_{10} – C_{20} and more) are formed. The solid fraction is represented by spheroidal monoparticles of unstructured PTFE macromolecules. The powder particles of ultrafine fluoroplast UPTFE (F-4D), obtained directly from the reactor, consist of plates with a particle size of 70–450 nm. The particles of the dry residue of UPTFE suspension in perfluorodecalin take the form of porous spheroidal agglomerates having pores of 50–300 nm in size. Suspension spheroids are in the range of 220–5500 nm.

Particles of UPTFE powder (F-4), obtained both directly from the reactor and UPTFE suspension in perfluorodecalin, consist of plates rolled into spheroids with a diagonal of 433–1132 nm. They are combined into agglomerates, having a diameter of 3–5 microns. Particles UPTFE obtained by the method of hydrothermal destruction, have a non-porous spheroidal shape with a diagonal of 400–3000 nm.

Fluorinated lubricants based on a copolymer of tetrafluoroethylene and ethylene, PTFE, UPTFE, obtained by thermal destruction with exhaustive fluoridation of cobalt trifluoride, UPTFE, obtained by the destruction of PTFE by hydrothermal method. UPTFE, obtained by thermal destruction with exhaustive fluoridation from fluoroplastic waste F-4D, provides the minimum coefficient of rolling friction. The formation of composite protective coatings of metals containing UPTFE with a thickness of up to 80 μm is studied.

Keywords: waste, fluoroplastic, ultradisperse, thermal destruction of polytetrafluoroethylene with exhaustive fluoride, hydrothermal degradation, lubricants, protective coatings.

Политетрафторэтилен (ПТФЭ) – базовый полимер класса фторопластов, обладающий рядом специфических свойств: высокой химической и климатической стойкостью, нерастворимостью в большинстве известных растворителей, высокой гидро- и лиофобностью, прекрасными электроизоляционными качествами, рекордно низким коэффициентом трения. Дополнительное достоинство полимера – сохранение эксплуатационных характеристик в широком температурном интервале, от минус 269 до плюс 260 °С, что является большой редкостью для полимеров. Материал подвергается механической обработке, что позволяет изготавливать из него разнообразные изделия. Он не подвержен старению, обладает биосовместимостью с живыми тканями, может включаться в живые организмы при попадании в окружающую среду (ОС). Набор уникальных свойств обеспечивает быстро растущее применение ПТФЭ во многих отраслях науки, техники, промышленности, в медицине и быту [1–5].

Одним из сдерживающих факторов, ограничивающих более широкое применение ПТФЭ, является экологический, связанный с образованием большого количества отходов при получении и производстве изделий из ПТФЭ, сложностями вторичной переработки отходов, их уничтожения, выделением при этом в ОС опасных веществ. При переработке ПТФЭ (фторопласта марки Ф-4 или его зарубежных аналогов, известных под названием «тефлон» и др.) образуется до 30% отходов, которые не имеют сродства к природным объектам и не подвергаются деструкции. В настоящее время в Российской Федерации накоплены сотни тысяч тонн отходов фторопласта марки Ф-4 и композиций на его основе [6]. В последние годы лишь часть этих отходов нашла применение, в частности, в производстве композиционных материалов из ультрадисперсного ПТФЭ (УПТФЭ) [7–10]. В связи с этим актуальной задачей является разработка

современных универсальных технологий переработки отходов ПТФЭ в УПТФЭ.

В отличие от переработки отходов термопластичных фторполимеров измельчением на дробилках, грануляцией или экструзией, переработка отходов ПТФЭ основана на необходимости дезинтеграции отходов высокой степени [8–15]. Для изготовления изделий размеры частиц, полученных из отходов, должны быть не более 200 мкм. В настоящее время используют преимущественно три метода измельчения.

Первый способ измельчения отходов [6] заключается в охлаждении материала хладагентами для придания ему хрупкости и последующем механическом измельчении в дробилках и мельницах. Образуется мелкодисперсный порошок ПТФЭ с частицами сферической формы. Однако способ неэкономичен из-за высокой стоимости оборудования и его обслуживания.

Второй способ [8–11] заключается в использовании механических дробилок после облучения ПТФЭ со снижением молекулярной массы до 10000. При сочетании нагрева (200–300 °С) и облучения получают порошок с размером частиц до 5 мкм. Тем не менее, радиационное облучение отходов ПТФЭ в значительных объемах нерентабельно, так как требует дорогостоящего оборудования.

Третий способ [8, 9, 16–19] включает процессы термодеструкции, сублимации продуктов разложения и конденсации в присутствии различных добавок, например, гидродифторида аммония. При этом образуется порошок УПТФЭ с выходом более 60% и достаточно высокой адгезионной способностью [13]. Для увеличения дисперсности, белизны порошка УПТФЭ и его выхода нами разработаны методы термодеструкции отходов ПТФЭ в присутствии водяного пара или трифторида кобальта [14, 16, 20].

Целью работы явилось изучение характеристик продуктов, полученных в результате

термодеструкции отходов фторопласта в условиях исчерпывающего фторирования или гидротермальной деструкции для их эффективного применения в широко востребованных трибологических материалах и покрытиях.

Объекты и методы исследования

В работе в качестве отходов фторопластов исследовали отходы производства суспензионного и эмульсионного ПТФЭ марок Ф-4 и Ф-4Д, отобранные в 2013–2015 гг. на ООО «ГалоПолимер Кирово-Чепецк». Процесс термодеструкции отходов производства фторопластов Ф-4 и Ф-4Д с исчерпывающим фторированием трифторидом кобальта или под воздействием водяного пара осуществляли на разработанных нами ранее лабораторной [16] и опытной промышленной установках [20].

Состав летучих продуктов, полученных при термодеструкции фторопластовых отходов ООО «ГалоПолимер Кирово-Чепецк», исследовали методами газожидкостной хроматографии и масс-спектрометрии на приборах Hewlett Packard Fisons Instruments MD 800, Hewlett Packard MD 800 Fisons GC 8000 и SHIMADZU с масс-селективным детектором и встроенной персональной ЭВМ для идентификации веществ по электронным библиотекам масс-спектров известных соединений.

Морфологию и структуру продуктов определяли методами сканирующей электронной микроскопии (СЭМ) с использованием микроскопа марки JEOLJSM-6510 LV (Япония) и программного пакета «Semmain menu».

Исследования элементного химического состава осуществляли энергодисперсионным рентгеновским микроанализом (ЭРМ) при помощи датчика, встроенного в электронный микроскоп.

Результаты и обсуждение

Состав и структура продуктов, полученных при термодеструкции отходов Ф-4Д с исчерпывающим фторированием. Состав летучей фракции, поглощённой перфтордекалином (ПФД), приведён в таблице 1.

Как видно, летучая фаза состоит из перфторалканов (ПФА) нормального строения C_nF_{2n+2} с молекулярной массой 338 и более. Твердая фракция УПТФЭ представлена сфероидальными блоками, образующимися из большого числа связанных частиц, состоящих из перфторалканов более низких, чем исходных, молекулярных масс.

На рисунках 1, 2 и в таблице 2 приведены результаты изучения структур уловленного порошка УПТФЭ и сухого остатка разделяющейся взвеси УПТФЭ в ПФД и их составов методом сканирующей электронной микроскопии (СЭМ) и энергодисперсионного анализа (ЭДА).

Частицы порошка УПТФЭ (Ф-4Д), полученного непосредственно из реактора, сферической или более сложной формы, имеют размеры 462–1969 нм. Сухой остаток взвеси УПТФЭ в ПФД приобретает вид более крупных образований, имеющих пустоты 50–300 нм.

Из таблицы 2 с данными ЭДА видно, что УПТФЭ на 20% состоит из углерода и на 80% – из фтора. В сухом остатке поглощённых летучих продуктов деструкции соотношение углерода и фтора изменяется до 32 : 56. Кроме того, появляется кислород и углекислый газ, а также продукты окисления парафинов, применяющихся при получении Ф-4Д в качестве регулятора молекулярной массы.

При использовании отходов фторопласта Ф-4Д для получения УПТФЭ методом термодеструкции с исчерпывающим фторированием

Таблица 1 / Table 1
 Состав летучих продуктов процесса термодеструкции отходов ПТФЭ (Ф-4Д) с исчерпывающим фторированием, уловленных ПФД
 Composition of volatile products of the thermal process of waste PTFE (F-4D) with exhaustive fluorination, caught by PFD

Время выхода, мин Time, min.	Название веществ Name of substance	Формула Formula	Относительная молекулярная масса Relative molecular mass
3,530	Перфторгексан / Perfluorohexane	C_6F_{14}	338
4,887	Перфтороктан / Perfluorooctane	C_8F_{18}	438
5,010	Перфтордекан / Perfluorodecane	$C_{10}F_{22}$	538
5,400	Перфтороктадекан / Perfluorooctadecane	$C_{18}F_{38}$	938
5,663	Перфторэйкозан / Perfluoroseicosan	$C_{20}F_{42}$	1038

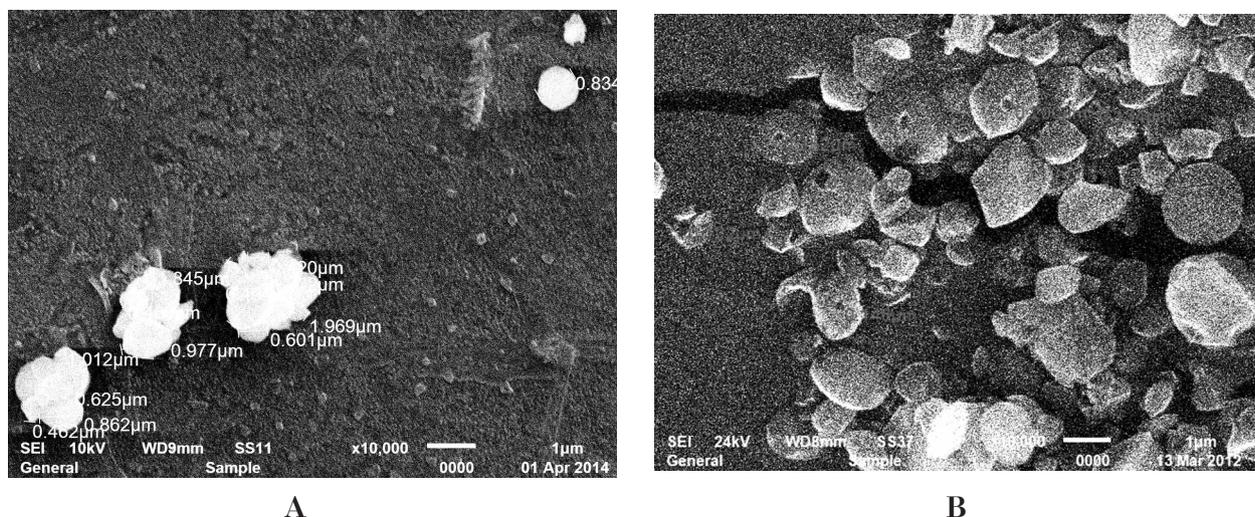


Рис. 1. Структура УПТФЭ (Ф-4Д). Метод термодеструкции с исчерпывающим фторированием: А – порошок, В – сухой остаток взвеси в ПФД. Увеличение 10000х
Fig. 1. Structure of UPTFE (F-4D). Method of thermal destruction with exhaustive fluorination: А – powder, В – a dry residue of suspended matter in perfluorodecalin. 10000x magnification

Таблица 2 / Table 2

Элементный состав УПТФЭ из отхода Ф-4Д / Elemental composition of UPTFE from waste F-4D

Порошок из реактора Powder from the reactor			Сухой остаток взвеси в ПФД* Dry residue of suspension in PFD*		
элемент element	весовой, % the weight, %	атомный, % atomic, %	элемент element	весовой, % the weight, %	атомный, % atomic, %
C	19,57	27,81	C	31,74	41,61
F	80,43	72,19	F	56,48	46,80
O	Отс. otn	0,00	O	11,78	11,59
Итого Subtotal	100,00	100,00	Итого Subtotal	100,00	100,00

*Примечание: * ПФД – перфтордекалин, основной компонент перфторана, применяемого в медицине в качестве заменителя крови / Note: * PFD is perfluorodecalin, the main component of perfluorane used in medicine as a blood substitute.*

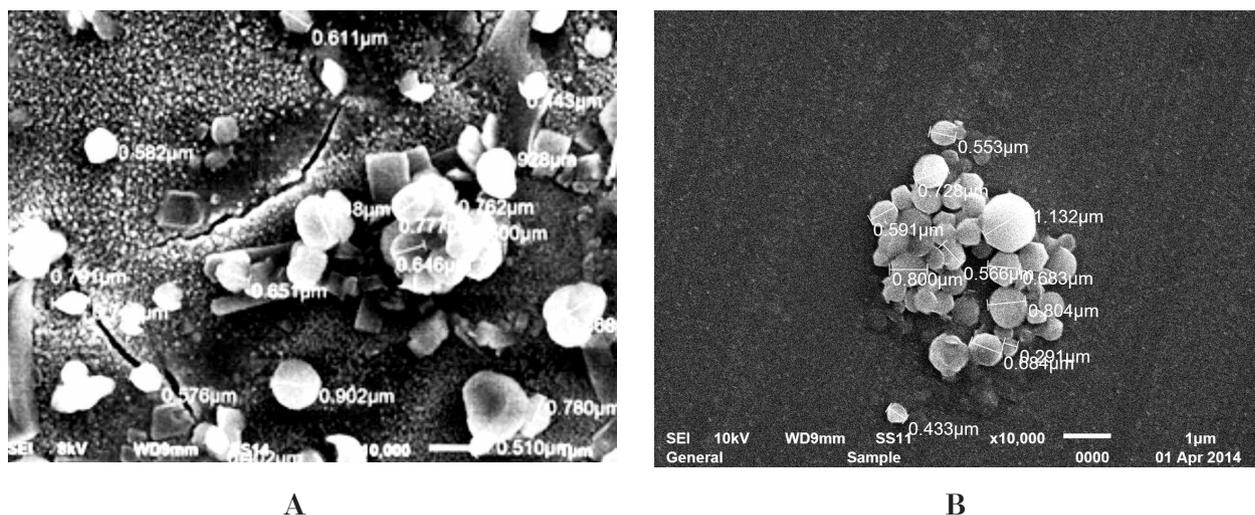


Рис. 2. Структура УПТФЭ (Ф-4). Метод термодеструкции с исчерпывающим фторированием: А – порошок, В – сухой остаток взвеси в перфтордекалине. Увеличение 10000х
Fig. 2. Structure of UPTFE (F-4). The method of thermal decomposition with exhaustive fluorination: А – powder, В – solids suspension in perfluorodecalin. 10000x magnification

Таблица 3 / Table 3

Элементный состав УПТФЭ (вес %) из отхода Ф-4
Elemental composition of EPTFE (weight %) of the waste F-4

Элемент Element	Термодеструкция с исчерпывающим фторированием The thermal destruction with a comprehensive fluoridation		Гидротермальная деструкция Hydrothermal destruction
	порошок из реактора powder from the reactor	сухой остаток взвеси в перфтордекалине the dry residue suspended matter in perfluorodecalin	порошок из реактора powder from the reactor
C	18,03–31,47	39,27–61,12	41,63–35,27
F	81,97–68,53	47,91–27,94	56,33–61,92
O	0	12,82–10,94	1,68–1,66
Cu	0	0	0,36–1,14
Итого Total	100	100	100

выход целевого продукта составляет более 93%. Образовавшийся порошок не требует очистки и может быть использован в производстве композитов, смазок и композиционных покрытий.

Структура и состав продуктов, полученных из отходов Ф-4 методом термодеструкции с исчерпывающим фторированием. На рисунке 2 и в таблице 3 приведены результаты изучения структур порошка УПТФЭ и сухого остатка взвеси УПТФЭ в перфтордекалине и их составов методами СЭМ и ЭДА.

Из рисунка 2 видно, что частицы порошка УПТФЭ, полученного непосредственно из реактора, представляют из себя сфероиды с диагональю 35–950 нм. Частицы сухого остатка взвеси УПТФЭ в перфтордекалине также имеют сфероидальную, более правильную, форму с размерами по диагонали 433–1132 нм. Они объединены в агломераты, имеющие в поперечнике 3–5 мкм. Частицы УПТФЭ, полученного методом гидротермаль-

ной деструкции, имеют беспористую сфероидальную форму с диагональю 400–4500 нм.

По спектрам, полученным ЭДА, определён элементный состав порошка и сухого остатка взвеси УПТФЭ в перфтордекалине (табл. 3). Здесь же приведены данные для порошка, полученного из фторопласта Ф-4 методом гидротермальной деструкции.

Из таблицы 3 видно, что УПТФЭ, в среднем, содержит 25% углерода и 75% фтора. В сухом остатке соотношение углерода и фтора изменяется в более широких пределах. Характерно также присутствие кислорода.

Как видно из таблицы 3, по сравнению с УПТФЭ, полученным методом термодеструкции с исчерпывающим фторированием, порошок из реактора гидротермальной деструкции содержит большее количество углерода и меньшее – фтора, а также кислород и примеси меди.

Применение продуктов деструкции отходов ПТФЭ в смазках. С целью изучения

Таблица 4 / Table 4

Определение коэффициента трения качения для различных веществ
Determination of the coefficient of rolling friction for different substances

Метод получения фторированных компонентов композитов Method for producing fluorinated composites components	Состав The composition	Угол наклона, град The angle of inclination, deg	$K_{тр}$ K_{tr}
Сополимеризация тетрафторэтилен-этилен Polymerization of ethylene-tetrafluoroethylene	Фторопласт Ф-4 PTFE F-4	5,7	0,083
Полимеризация тетрафторэтилена Polymerization of tetrafluoroethylene	Фторопласт Ф-4Д PTFE F-4D	7,8	0,096
Деструкция ПТФЭ гидротермальным методом Destruction of PTFE hydrothermal method	УПТФЭ URTFE	3,1	0,046
Термодеструкция ПТФЭ с исчерпывающим фторированием трифторидом кобальта Thermal destruction of PTFE with exhaustive fluorination by cobalt fluoride	УПТФЭ URTFE	2,9	0,016

Таблица 5 / Table 5

Составы электролитов и режимы нанесения композиционных покрытий
Electrolyte compositions and modes of application of composite coatings

Состав электролита, г/л Electrolyte composition, g/L	Плотность тока, А/дм ² Current density, A/dm ²	Скорость осаждения композита, г/дм ² ·ч The deposition rate of the composite, g/dm ² ·h	Толщина композита, мкм The thickness of the composite, μm		
Композиционное электрохимическое покрытие (КЭП)* Composite electrochemical coating (СЕР)*					
ZnO 8–10, NaOH 80–200, УПТФЭ 1,1 / УРТНЕ 1,1		КЭП Zn-УПТФЭ / СapZn-УРТНЕ	Zn + ПТФЭ Zn + РТНЕ	Zn	ПТФЭ РТНЕ
	1,0	11,5±0,9	5,9±0,1	5,0±0,2	0,9±0,1
	3,0	21,9±0,8	11,4±0,1	9,6±0,8	1,8±0,1
Композиционное химическое покрытие (КХП)** Composite electrochemical coating (ССР)**					
NiSO ₄ ·7 H ₂ O 10–30, NaH ₂ PO ₂ ·H ₂ O 10–15, CH ₃ COONa 10–12,5, CH ₃ COOH 8,0, УПТФЭ 1,1 / УРТНЕ 1,1	Отс. Отн.	(0,95±0,09)– (1,76±0,18)	8,54–5,66	7,6±4,1	0,25–0,40

Примечание: * температура 20–23 °С, время 20 мин; ** температура 87,5 °С; время 60 мин.
Note: * temperature 20 to 23 °C, 20 min; ** temperature of 87.5 °C; time 60 min.

возможности применения УПТФЭ в качестве компонента при изготовлении низкоадгезионных смазывающих материалов определяли коэффициент трения качения (табл. 4).

Из таблицы 4 видно, что порошок УПТФЭ, полученный методом термодеструкции из отходов фторопласта, имеет наименьший коэффициент трения качения. Полученный продукт оптимально использовать как компонент эффективных твёрдых и консистентных трибологических материалов различного назначения.

Применение переработанных таким образом отходов фторопласта перспективно в качестве дисперсной фазы при осаждении на металлическую основу совместно с металлами и их солями. В результате можно получить композиционные покрытия, обладающие свойствами металлов и фторполимерной фазы. В качестве примеров в таблице 5 приведены основные отработанные режимы для нанесения композиционного электрохимического (Zn-ПТФЭ) и химического (Ni-Р-ПТФЭ) покрытий на металлическую основу.

Оказалось, что присутствие суспензии УПТФЭ в растворах цинкования и никелирования в равных количествах приводит к образованию композитов с разной толщиной слоя ПТФЭ. В процессе электрохимического формирования композита толщина слоя ПТФЭ в 4,0–4,5 раза больше, чем при осаждении химического композита.

Заключение

Определены структура и состав продуктов термодеструкции ПТФЭ Ф-4 и Ф-4Д, полученных в разработанных условиях. Установлено, что УПТФЭ, полученный термодеструкцией, практически неизменен по составу и размерам частиц, в то время как порошок из реактора содержит большее количество углерода, меньшее – фтора, а также кислород и примеси меди.

Выявлены возможности применения УПТФЭ в качестве компонентов при производстве эффективных смазывающих материалов или электрохимических и химических износостойких композиционных покрытий с повышенной коррозионной стойкостью в агрессивных средах.

Специальные свойства композиционных покрытий позволят применять их взамен известных покрытий для увеличения срока службы изделий, износо- и коррозионной стойкости, увеличения микротвёрдости.

Изученные характеристики процесса термической переработки отходов ПТФЭ и положительные испытания образующихся твёрдых продуктов позволяют разработать технологические схемы переработки отходов производства ПТФЭ в различные твёрдые и жидкие составляющие.

Литература

1. Бузник В.М. Состояние отечественной химии фторполимеров и возможные перспективы развития // Журнал Российского химического общества имени Д.И. Менделеева. 2008. Т. LII. № 3. С. 7–12.

2. Уолл Л.А. Фторполимеры. Москва: Издательство Мир, 1975. 448 с.

3. Ishikawa N., Kobayashi Y. Fluorine. Chemistry and application. Tokyo, 1979. 280 p.

4. Фукс С.Л., Хитрин С.В., Девятерикова С.В. Разработка условий использования нецелевых продуктов производства фторполимеров // Журнал прикладной химии. 2004. Т. 77. № 9. С. 1491–1496.

5. Хитрин С.В., Фукс С.Л., Рязанцева Е.А., Рязанская Ю.В. Получение композиционных электрохимических покрытий с использованием отходов фторполимерного производства // Журнал прикладной химии. 2012. Т. 85. № 6. С. 969–972.

6. Хитрин С.В., Фукс С.Л., Девятерикова С.В., Захаров В.Ю., Родников С.Н. Экологические проблемы переработки отходов фторопластов // Теоретическая и прикладная экология. 2011. № 1. С. 76–79.

7. Рязанцева Е.А., Фукс С.Л., Хитрин С.В. Исследование влияния отходов фторполимерного производства на свойства композиционных электрохимических покрытий цинк – фторполимер // Журнал прикладной химии. 2012. Т. 85. № 4. С. 616–620.

8. Кирюхин Д.П., Ким И.П., Бузник В.М., Игнатъева Л.Н., Куравый В.Г., Сахаров С.Г. Радиационно-химический синтез теломеров тетрафторэтилена для создания тонких защитных фторполимерных покрытий // Журнал Российского химического общества им. Д.И. Менделеева. 2008. Т. LII. № 3. С. 131–139.

9. Кантаев А.С., Бузник В.М., Дьяченко А.Н. Способ переработки отходов политетрафторэтилена // Патент РФ № 2437901. Приоритет от 01.07.2010. Дата публикации 27.12.2011. Бюлл. № 36.

10. Ступко Т.В., Невзоров В.Н., Костылев А.А. Роторно-вихревая мельница тонкого помола // Патент РФ № 2537497. Приоритет от 09.11.2012. Опубл. 10.01.2015. Бюлл. № 1.

11. Краснов А.А. Фторопласты. Описание материала и обзор рынка [Электронный ресурс] http://www.ntds.ru/statyi/041_ftoroplasty_opisanie_materialov_i_obzor_rynka.pdf (Дата обращения: 11.02.2015).

12. Fuks S.L., Sukhanova E.N., Khitrin S.V., Filatov V.Y. Production technology of ultradisperse polytetrafluoroethylene and conditions of its application // European Science and Technology. Munich. Germany. 2012. V. 1. P. 57–62.

13. Блинов И.Б., Дедов С.А., Кузнецов В.Н. Способ переработки отходов политетрафторэтилена // Патент РФ № 2387632. Приоритет от 20.01.2010. Дата публикации 04.2010. Бюлл. № 12.

14. Хитрин С.В., Фукс С.Л., Казиевков С.А., Филатов В.Ю., Суханова Е.Н. Способ переработки фторопластов и материалов, их содержащих, с получением ультрадисперсного фторопласта и перфторпарафинов // Патент РФ № 2528054. Приоритет от 05.12.2011. Дата публикации 10.09.2014. Бюлл. № 25.

15. Сеземин А.В., Самара В.А., Кудрявцев В.Н. Способ получения порошка вторичного политетрафторэтилена // Патент РФ № 2292364. Приоритет от 14.12.2005. Дата публикации 27.01.2007. Бюлл. № 3.

16. Филатов В.Ю., Мулин А.В., Казиевков С.В., Хитрин С.В., Фукс С.Л. Исследование деполимеризации политетрафторэтилена в присутствии водяного пара или переносчика фтора // Журнал прикладной химии. 2011. № 1. С. 147–150.

17. van der Walt I.J., Bruinsma O.S.L. Depolymerization of clean unfilled PTFE waste in a continuous process // Journal of Applied Polymer Science. 2006. V. 102 (3). P. 2752–2759.

18. Bruinsma O.S.L., van der Walt I.J., Grunenburg A.T., Nel J.T. The continuous depolymerization of filled polytetrafluoroethylene with a continuous process // Journal of Applied Polymer Science. 2008. V. 109 (1). P. 264–271.

19. Бузник В.М., Гришин М.В., Вопилов Ю.Е., Игнатъева Л.Н., Терехов А.С., Слободюк А.Б. Особенности строения порошковой формы политетрафторэтилена марки «ФЛУРАЛИТ» // Пластиковые материалы. 2010. № 1. С. 63–67.

20. Фукс С.Л., Филатов В.Ю., Хитрин С.В., Казиевков С.А. Исследование возможностей рекуперации отходов фторопластов // Буглеровские сообщения. 2007. Т. 11. № 3. С. 61–67.

21. Куравый В.Г., Бузник В.М. Способ получения нанодисперсного фторорганического материала // Патент RU № 2341536. Приоритет 30.07.2007. Дата публикации 20.12.2008. Бюлл. № 35.

Reference

1. Buznik V.M. The state of domestic chemistry of fluoropolymers and possible prospects of development // Zhurnal Rossiyskogo khimicheskogo obshchestva imeni D.I. Mendeleeva. 2008. V. LII. No. 3. P. 7–12 (in Russian).

2. Wall L.A. Fluoropolymers. Moskva: Mir, 1975. 448 p. (in Russian).

3. Ishikawa N., Kobayashi Y. Fluorine. Chemistry and application. Tokyo, 1979. 280 p.

4. Fuks S.L., Khitrin S.V., Devyaterikova S.V. The development of the terms of use of inappropriate products of fluorocarbon polymers // Russian Journal of Applied Chemistry. 2004. V. 77. No. 9. P. 1491–1496 (in Russian). doi: 10.1007/s11167-005-0056-y

5. Khitrin S.V., Fuks S.L., Ryazantseva E.A., Ryazanskaya Yu.V. Production of composite electrochemical coatings using waste fluoropolymer production // Russian

Journal of Applied Chemistry. 2012. V. 85. No. 6. P. 969–972 (in Russian). doi: 10/1134/S100704277212050105

6. Khitrin S.V., Fuchs S.L., Devyaterikova S.V., Zakharov V.Yu., Rodnikov S.N. Ecological problems of waste processing of fluoroplasts // Theoretical and Applied Ecology. 2011. No. 1. P. 76–79 (in Russian). doi: 10.25750/1995-4301-2011-1-076-079

7. Ryazantseva E.A., Fuchs S.L., Khitrin S.V. Research of influence of waste production of fluoropolymer on the properties of composite electrochemical coatings with zinc – fluoropolymer // Russian Journal of Applied Chemistry. 2012. V. 85. No. 4. P. 616–620 (in Russian). doi: 10/1134/S1070427212040143

8. Kiryukhin D.P., Kim I.P., Bouzник V.M., Ignatieva L.N., Kuravy V.G., Sakharov S.G. Radiation-chemical synthesis of tetrafluoroethylene telomers for creation of thin protective fluoropolymer coatings // Zhurnal Rossiyskogo khimicheskogo obshchestva imeni D.I. Mendeleeva. 2008. V. LII. No. 3. P. 131–139.

9. Kantaev S.A., Buznik V.M., Dyachenko A.N. Method of processing polytetrafluoroethylene wastes // Patent RU No. 2437901. Priority from 01.07.2010. Publ. 27.12.2011. Bull. No. 36 (in Russian).

10. Stupko T.V., Nevzorov V.N., Kostylev A.A. Rotary-vortex mill of fine grinding // Patent RU No. 2537497. Priority from 09.11.2012. Publ. 10.01.2015. Bull. No. 1 (in Russian).

11. Krasnov A.A. Fluoropolymers. Description of material and overview of the market [Internet resource] http://www.ntds.ru/statyi/041ftoroplasty_opisanie_materialovobzor_rynka.pdf (Accessed: 11.02.2015).

12. Fuks S.L., Sukhanova E.N., Khitrin S.V., Filatov V.Y. Production technology of ultradisperse polytetrafluoroethylene and conditions of its application // European Science and Technology. Munich. Germany. 2012. V. 1. P. 57–62.

13. Blinov I.B., Dedov S.A., Kuznetsov V.N. Method of processing polytetrafluoroethylene wastes // Patent RU No. 2387632. Priority from 20.01.2010. Publ. 27.04.2010. Bull. No. 12 (in Russian).

14. Khitrin S.V., Fuchs S.L., Kasimenkov S.A., Filatov V.Yu., Sukhanova E.N. Method of processing fluoropolymers and materials containing them, preparation of ultra-dispersed PTFE and incorporation // Patent RU No. 2528054. Priority from 05.12.2011. Publ. 10.09.2014. Bull. No. 25 (in Russian).

15. Sesamin V.A., Samara V.A., Kudryavtsev V.N. A method of producing the secondary powder of polytetrafluoroethylene // Patent RU No. 2292364. Priority from 14.12.2005. Publ. 27.01.2007. Bull. No. 3 (in Russian).

16. Filatov V.Yu., Murin A.V., Kazienkov S.A., Khitrin S.V., Furs S.L. Depolymerization of polytetrafluoroethylene in the presence of water vapor or fluorine-transfer agent // Russian Journal of Applied Chemistry. 2011. No. 1. P. 147–150 (in Russian). doi: 10.1134/S1070427211019265

17. van der Walt I.J., Bruinsma O.S.L. Depolymerization of clean unfilled PTFE waste in a continuous process // Journal of Applied Polymer Science. 2006. V. 102 (3). P. 2752–2759. doi: 10.1002/app.24399

18. Bruinsma O.S.L., van der Walt I.J., Grunenburg A.T., Nel J.T. **The continuous depolymerization of filled polytetrafluoroethylene with a continuous process** // Journal of Applied Polymer Science. 2008. V. 109 (1). P. 264–271. doi: 10.1002/app.27380

19. Buznik V.M., Grishin M.V., Vopilov J.E., Ignatieva L.N., Terekhov A.S., Slobodyuk A.B. Features of the structure of the powder form of polytetrafluoroethylene of the FLURALIT brand // Plastic materials. 2010. No. 1. P. 63–67 (in Russian).

20. Fuchs S.L., Filatov V.Yu., Khitrin S.V., Kazienkov S.A. A study of the possibilities of waste recovery fluoropolymers // Butlerovskie soobshcheniya. 2007. V. 11. No. 3. P. 61–67 (in Russian).

21. Kuravy V.G., Buznik V.M. Method of obtaining nanodispersive fluoroorganic material // Patent RU No. 2341536. Priority 30.07.2007. Publ. 20.12.2008. Bull. No. 35 (in Russian).

Экологические аспекты в производстве майонеза

© 2019. Э. И. Рахимова, аспирант,

А. С. Сироткин, д. т. н., профессор, зав. кафедрой,

Казанский национальный исследовательский технологический университет,

420015, Россия, г. Казань, ул. Карла Маркса, д. 68,

e-mail: elvira.r.07@mail.ru

Сточные воды, образующиеся при производстве майонеза, представляют собой воды от промывки оборудования и содержат в качестве доминирующих примесей жиры и масла в концентрации в среднем от 0,8 до 3% (масс.). Отмечено, что в процессе утилизации сточные воды кислого и щелочного характера подвергаются процессу ультрафильтрации, и отделенные жиры подаются в soapstock, образующийся на стадии щелочной рафинации при переработке и производстве подсолнечного масла и содержащий воду, мыло, увлеченный нейтральный жир, избыточную щелочь. Актуальным является дальнейшее использование soapstock в мыловарении с получением продукции натурального характера. Экспериментально показано, что при производстве майонеза проведение комплексной 3-х стадийной мойки технологического оборудования и трубопроводов, состоящей из щелочной, кислотной мойки и обработки дезинфицирующим раствором, с включением дополнительной обработки острым паром при температуре 110 °C и избыточном давлении 0,7 атм в течение 15 мин позволяет увеличить производственный цикл между мойками оборудования, уменьшить количество производственных сточных вод, а также снизить в 3–4 раза их загрязненность жирами и маслами. Отмечено, что периодичность мойки с включением обработки оборудования и трубопроводов в собранном виде острым паром должна быть реализована 1 раз в 5 сут, что позволяет снизить количество образующихся сточных вод на 33% и обеспечить снижение затрат на указанные технологические операции. Кроме того, показано, что при производстве майонеза дополнительная обработка оборудования острым паром в процессе его комплексной мойки обеспечивает микробиологическую безопасность готового продукта на протяжении срока хранения.

Ключевые слова: микробиологическая безопасность, сточные воды, острый пар, майонез, молочнокислые бактерии, кислотность.

Environmental aspects in the production of mayonnaise

© 2019. E. I. Rakhimova ORCID: 0000-0001-9066-0042, A. S. Sirotkin ORCID: 0000-0002-4480-9907

Kazan National Research Technological University,

68, Karl Marx St., Kazan, Russia, 420015,

e-mail: elvira.r.07@mail.ru

Wastewater from the production of mayonnaise is water from washing equipment and contains fats and oils as a dominant impurity in an average concentration of 0.8 to 3% (mass.). It was noted that in the process of disposal, acid and alkaline wastewater undergoes an ultrafiltration process, and the separated fats are fed to the soapstock, formed at the stage of alkaline refining during processing and production of sunflower oil and containing water, soap, absorbed neutral fat, excess alkali. Further use of soapstock in soap making with the production of natural products is relevant. It has been experimentally shown that in the production of mayonnaise, a comprehensive 3-stage washing of technological equipment and pipelines, consisting of an alkaline, acid washing and disinfecting solution treatment, with the inclusion of additional treatment with hot steam at a temperature of 110 °C and an overpressure of 0.7 bar for 15 min allows you to increase the production cycle between equipment washes, reduce the amount of industrial wastewater, and also reduce their pollution by fats and oils by 3-4 times. It was noted that the frequency of washing, including the processing of equipment and pipelines assembled with hot steam, should be implemented 1 time in 5 days, which allows to reduce the amount of wastewater generated by 33% and to reduce costs for these technological operations. In addition, it has been shown that the additional processing of equipment with hot steam during its complex washing ensures the microbiological safety of the finished product over the shelf life.

Keywords: microbiological safety, wastewater, sharp steam, mayonnaise, lactic acid bacteria, acidity.

Увеличение потребления ресурсов и возрастание количества отходов является чрезвычайно актуальной экологической проблемой промышленных производств, что происходит

вследствие увеличения благосостояния населения, роста объёмов и ассортимента промышленной продукции. Следует отметить, что современные предприятия отличаются реали-

зацией программ экономного производства и вовлечения отходов в промышленный цикл в качестве вторичного сырья, созданием экологически обеспеченных производственных процессов с переработкой большого количества отходов. Так, сточные воды (СВ), образующиеся в процессах мойки оборудования, могут подвергаться вторичному использованию, сопровождающемуся определёнными затратами; в противном случае они обезвреживаются перед сбросом в водоём-приёмник. Очевидно, что снижение количества СВ, образующихся в производственных процессах, способствует повышению экологической безопасности промышленных предприятий.

Масложировая промышленность выступает важнейшей составной частью агропромышленного комплекса. Она обеспечивает население масложировой продукцией, отличающейся высокой питательной и энергетической ценностью. В условиях глобализации природоохранных проблем главным критерием повышения жизненного уровня населения и обеспечения продовольственной безопасности является разработка и производство безопасной масложировой продукции с учётом влияния всех экологических составляющих [1, 2], а также надёжное обезвреживание отходов производства, среди которых основным по массе и загрязнённости являются СВ.

Сточные воды, образующиеся при производстве майонеза, представляют собой воды от промывки оборудования и содержат в качестве примесей жиры и масла. Содержание общего жира в СВ составляет в среднем от 0,8 до 3,0% (масс.); при этом жир содержится в промывной воде в эмульгированном виде, а также в виде прослоек нейтрального жира в воде. Для очистки СВ на масложировых предприятиях широко применяется способ разложения органических веществ серной кислотой с отделением смеси нейтрального жира и жирных кислот, а образующиеся отходы используются в мыловарении.

Продукты питания состоят из первичных биоматериалов, которые со временем неизбежно разлагаются и портятся. Ухудшение качества и порчу продуктов питания предотвратить невозможно, однако можно замедлить процессы, определяющие потерю качества продуктов путём правильного подбора рецептурных компонентов, экологического обеспечения технологических процессов производства, упаковки, хранения и транспортировки [3].

В масложировых продуктах, в том числе в майонезах, различают взаимосвязанные меж-

ду собой виды порчи: микробиологическая, химическая и физическая (механическая).

Эпидемиологическая безопасность масложировой продукции, в том числе и майонеза, прежде всего, определяется микробиологическими показателями. Микробиологическое обсеменение как готового продукта, так и сырьевых компонентов, происходит в процессе производства и транспортировки и является причиной возникновения проблем пищевой безопасности. В связи с тем, что технологический процесс производства майонеза не подразумевает использование промышленно полезных микроорганизмов, развитие контаминирующей микрофлоры возможно за счёт привнесённой в продукт вместе с сырьевыми ингредиентами или с поверхности оборудования, способствуя микробиологической порче готового продукта [4].

К микробиологическим видам порчи майонеза относят газо- и кислотообразование [4], вызываемые обсеменением молочнокислыми бактериями и дрожжами; бомбаж, возникающий вследствие развития бактерий рода *Clostridium* и дрожжей; горький вкус, обусловленный разложением белка гнилостными бактериями.

Оценивая сырьевые ингредиенты, входящие в состав рецептуры, следует отметить, что только подсолнечное масло является микробиологически устойчивым. Таким образом, источниками контаминации продукта, с точки зрения микробиологических процессов, являются ингредиенты, составляющие водную фазу майонеза и санитарно-гигиеническое состояние производства [5].

Общепринятая схема мойки и санитарная обработка технологического оборудования при производстве майонеза состоит из этапов: щелочной и кислотной мойки, дезинфекции [6]. Ненадлежащая мойка и дезинфекция технологического оборудования и рабочих поверхностей является причиной роста и развития микроорганизмов, которые, объединяясь в колонии, формируют биоплёнки, с которыми бороться существенно сложнее, чем с индивидуальными микроорганизмами. Известно [7], что в присутствии загрязнений органического происхождения дезинфицирующая активность рабочих растворов снижается.

В любом масложировом производстве обязательно участвует вода, которая после её непосредственного использования, может возвращаться обратно в цикл для повторного снабжения производственных процессов предприятия или же сбрасываться в центральные

канализационные системы. При этом расход воды для проведения мойки и санитарной обработки оборудования технологической линии производства майонеза производительностью 1 т/час составляет 5 м³/сут кислых и щелочных СВ, содержащих в своём составе жирные кислоты [8]. Кислые и щелочные СВ сливаются на ультрафильтрацию, где улавливаются жиры, которые затем подаются в соапсток, образующийся на стадии щелочной рафинации при переработке и производстве подсолнечного масла и содержащий воду, мыло, увлечённый нейтральный жир, избыточную щёлочь. Соапсток используется в мыловарении [8, 9].

Целью исследования являлась оценка экологической безопасности производства майонеза, основанной на результатах обработки технологического оборудования острым паром для обеспечения его микробиологической безопасности.

Объекты и методы исследования

Оценивали дополнительное включение этапа стерилизации технологического оборудования и трубопроводов в собранном виде острым паром при температуре 110 °С и избыточном давлении 0,7 атм в течение 15 минут к общепринятой схеме мойки и санитарной обработки технологического оборудования.

Исследованию подвергались производственные промывные воды (сточные воды), в которых определяли массовую долю жира после проведения мойки и санитарной обработки оборудования технологической линии производства майонеза без включения этапа стерилизации, а также с включением этапа сте-

рилизации острым паром в регламент мойки.

С точки зрения обеспечения экологической безопасности продукции для потребителя, исследованию также подвергались образцы майонеза 67%-жирности с целью определения нормированных микробиологических показателей безопасности готового продукта, а также выявления нерегламентируемых молочнокислых микроорганизмов и кислотности [10].

Отбор образцов майонеза со стадии фасовки продукции проводился ежедневно в течение 6 дней. Образцы хранились в термостате при температуре 30±2 °С в течение 9 сут с целью провоцирования микробиологических изменений, так как указанный температурный режим является наиболее благоприятным для развития микроорганизмов и позволяет сделать прогноз микробиологической стабильности майонеза.

Результаты и обсуждение

В процессе исследования состава образцов промывных вод, полученных путём обработки оборудования острым паром, а также без обработки паром отмечено снижение массовой доли жира в СВ (табл. 1).

Данные таблицы 1 свидетельствуют о том, что в исследуемых образцах промывной воды, полученных с включением в процесс мойки этапа обработки острым паром, наблюдается снижение общего количества СВ на 33% вследствие пропарки оборудования из-за уменьшения количества моек, несмотря на увеличение объёма воды на 1 мойку в среднем на 20%.

Таблица 1 / Table 1
Результаты экспериментальных данных / Results of experimental data

Наименование показателя Name of indicator	Для образцов / For samples	
	без обработки оборудования острым паром / without sharp steam treatment	с обработкой технологического оборудования острым паром / with processing equipment with sharp steam
Массовая доля жира в промывной воде / Mass fat content in the wash water, %	0,8–1,0	0,3–0,4
Количество моек технологического оборудования / The number of washing processing of equipment	9	5
Расход воды для проведения однократной мойки и санитарной обработки оборудования технологической линии производства майонеза, м ³ /сут Water consumption for a single washing and sanitization of equipment of the mayonnaise production line, m ³ /day	5	6

Таблица 2 / Table 2

Нормированные микробиологические показатели для оценки качества майонеза
Normalized microbiological indicators to assess the quality of mayonnaise

Группа продуктов / Product group	Масса продукта (г), в которой не допускаются Product weight (g) in which not allowed		Дрожжи, КОЕ/г, не более Yeast, CFU /g, not more	Плесени, КОЕ/г, не более Mold, CFU/g, not more
	БГКП(колиформы) СГВ* (coliforms)	патогенные микроорганизмы, в т. ч. <i>Salmonella</i> pathogenic microorganisms, including <i>Salmonella</i>		
Майонез Mayonnaise	0,1	25,0	$5 \cdot 10^2$	50

Таблица 3 / Table 3

Результаты определения молочнокислых бактерий в образцах майонеза
при температуре хранения образцов 30 ± 2 °С в течение 9 сут / The results of determination
of lactic acid bacteria in mayonnaise samples at a sample storage temperature of 30 ± 2 °C for 9 days

Время отбора образцов после мойки, сут. Sampling time after washing, day	Продолжительность термостатирования, сут. The duration of incubation, days.				
	1	3	5	7	9
Число КОЕ/г для образцов без обработки острым паром The number of CFU/g for samples without treatment steaming					
1–2 сут / 1–2 day	< 10	< 10	< 10	< 10	< 10
3 сут / 3 day	< 10	$5 \cdot 10^1$	$3 \cdot 10^2$	$1 \cdot 10^3$	$2 \cdot 10^3$
4 сут / 4 day	< 10	$8 \cdot 10^1$	$4 \cdot 10^2$	$5 \cdot 10^4$	$1 \cdot 10^5$
5 сут / 5 day	< 10	$3 \cdot 10^3$	$5 \cdot 10^4$	$1 \cdot 10^7$	сплошной рост continuous growth
6 сут / 6 day	< 10	2×10^4	1×10^7	сплошной рост continuous growth	
Число КОЕ/г для образцов с обработкой острым паром The number of CFU/g for samples with a steaming					
1–5 сут / 1–5 day	< 10	< 10	< 10	< 10	< 10
6 сут / 6 day	< 10	$4 \cdot 10^1$	$3 \cdot 10^2$	$8 \cdot 10^2$	$2 \cdot 10^3$

В процессе анализа санитарной безопасности продукции и предотвращения экологического риска для населения в результате потребления некачественной продукции применялись прогностические тесты выявления микробиологической порчи, которые состояли в изучении кинетики роста микроорганизмов в благоприятных условиях и возможности оценки микробиологической стабильности майонеза.

Необходимо отметить отсутствие бактерий группы кишечной палочки (БГКП) и бактерий рода *Salmonella* во всех исследованных образцах, что положительно характеризует технологический процесс производства экспериментальных партий майонеза. В соответствии с техническим регламентом Таможенного союза на масложировую продукцию (ТР ТС 024/2011 № 883 от 09.11.2011) безопасность

майонеза определяется микробиологическими показателями, приведёнными в таблице 2.

В процессе исследования образцов, полученных путём обработки оборудования острым паром и без обработки паром, не выявлено роста и развития дрожжей и плесневых грибов, значения числа КОЕ которых не более 10, что объясняется наличием в составе рецептуры консерванта – сорбата калия, проявляющего фунгистатическое действие, подавляя развитие дрожжей и плесневых грибов, однако не подавляющего рост молочнокислой флоры [11] (табл. 3).

Данные таблицы 3 свидетельствуют о том, что в исследуемых образцах майонеза, произведённых с включением в процесс мойки этапа обработки острым паром, в процессе хранения рост молочнокислых бактерий наблюдается лишь в образцах, выработанных на 6-е сутки

после обработки оборудования острым паром. Повышение показателя кислотности в процессе хранения наблюдается на 6-е сутки от начала проведения мойки.

Изменения микробиологической картины исследуемых образцов майонеза, выработанных без включения этапа обработки острым паром в процесс мойки, наблюдались для молочнокислых бактерий на третьи сутки термостатирования. Их развитие способствовало повышению кислотности продукта, что оценивается органолептически и относится к органолептической порче готового продукта.

Важно отметить, что показатель кислотности майонеза в пересчёте на уксусную кислоту, не должен превышать 1,0%, однако кислотность традиционных видов майонеза на практике обычно не превышает уровня 0,3%. Известно также, что повышение кислотности майонеза может способствовать консервированию продукта с замедлением роста и отмиранием контаминирующих микроорганизмов [12].

Применение острого пара для обработки оборудования в процессе комплексной мойки при соблюдении режимов хранения образцов, рекомендованных производителем и утверждёнными нормативными документами, а именно от 0 до +18 °С, обеспечивает повышение микробиологической стабильности майонеза и обуславливает замедление изменений физико-химических и органолептических показателей в процессе хранения.

Экспериментально подтверждено увеличение срока хранения продукта с 3 до 5 сут по показателям микробиологической безопасности и физико-химическим показателям.

По полученным экспериментальным данным можно сделать вывод о том, что проведение комплексной мойки оборудования с включением дополнительной обработки острым паром позволяет увеличить производственный цикл между мойками оборудования, соответственно, уменьшить количество воды на приготовление дезинфицирующих растворов и суммарное количество СВ. Показано, что периодичность мойки с включением обработки оборудования острым паром должна быть 1 раз в 5 сут, что позволяет уменьшить количество образующихся СВ на 33% и обеспечить снижение затрат на указанные технологические операции.

Заключение

На основании полученных результатов установлено, что проведение комплексной мойки оборудования с включением дополни-

тельной обработки острым паром позволяет увеличить производственный цикл между мойками оборудования, вследствие чего обеспечивается снижение содержания жира в 3–4 раза в промывных (сточных) водах, уменьшение общего количества СВ в среднем на 33%, а также микробиологическая безопасность готового продукта и увеличение его срока хранения.

Литература

1. Новиков С.Г., Глотова С.Г., Куценко В.Н., Левченко О.В. Экологическая безопасность пищевых продуктов // Актуальные проблемы социально-гуманитарного и научно-технического знания. 2017. № 4. С. 5–8.
2. Донченко Л.В, Коцаев А.Г., Старшинов Р.В. Экологические проблемы при производстве продуктов питания // Наилучшие доступные технологии. Применение в различных отраслях. М.: Изд-во «Перо», 2017. С. 134–141.
3. Depree J.A., Savage G.P. Physical and flavor stability of mayonnaise // Trends in Food Science & Technology. 2001. V. 12. No. 5–6. P. 157–163.
4. Гусева К. Микробиологический контроль качества майонеза в процессе хранения // Масла и жиры. 2005. № 1 (47). С. 4–5.
5. Ливинская С.А., Лунова Е.С. Совершенствование схемы контроля показателей безопасности при производстве майонеза // Масла и жиры. 2006. № 1 (59). С. 12–13.
6. Нечаев А.П., Кочеткова А.А., Нестерова И.Н. Майонезы. СПб.: ГИОРД, 2000. 80 с.
7. Белозеров Д.Н. Мойка и дезинфекция: от проблемы к решению // Пищевая промышленность. 2002. № 10. С. 10–11.
8. НТП 53-91 Нормы технологического проектирования производства майонеза. М.: Гипропицепром, 1991. 74 с.
9. Haas M.J., Bloomer S., Scott K. Simple, high-efficiency synthesis of fatty acid methyl esters from soapstock // Journal of the American Oil Chemists' Society. 2000. V. 77. No. 4. P. 373–379.
10. ГОСТ 31762-2012. Майонезы и соусы майонезные. Правила приёмки и методы испытаний. М.: Стандартинформ, 2014. 7 с.
11. Нечаев А.П., Траубенберг С.Е., Кочеткова А.А. Пищевая химия. СПб.: ГИОРД, 2003. 640 с.
12. Тарасова Л.И., Носовицкая Ф.П., Тагиева Т.Г., Завадская И.М., Жицкова С.А. К вопросам о качестве майонезной продукции // Пищевая промышленность. 2017. № 10. С. 50–53.

References

1. Novikov S.G., Glotova S.G., Kutsenko V.N., Levchenko O.V. Environmental food safety // Aktualnye problemy sotsialno-gumanitarnogo i nauchno-

tekhnicheskogo znaniya. 2017. No. 4. P. 5–8 (in Russian).

2. Donchenko L.V., Koshchaev A.G., Starshinov R.V. Environmental problems in food production // *Nailuchshie dostupnye tekhnologii. Primenenie v razlichnykh otraslyakh*. Moskva: Izd-vo “Pero” 2017. P. 134–141 (in Russian).

3. Depree J.A., Savage G.P. Physical and flavor stability of mayonnaise // *Trends in Food Science & Technology*. 2001. V. 12. No. 5–6. P. 157–163.

4. Guseva K. Microbiological quality control of mayonnaise during storage // *Masla i zhiry*. 2005. No. 1 (47). P. 4–5 (in Russian).

5. Livinskaya S.A., Luneva E.S. Improving the scheme of control of safety indicators in the production of mayonnaise // *Masla i zhiry*. 2006. No. 1 (59). P. 12–13 (in Russian).

6. Nechaev A.P., Kochetkova A.A., Nesterova I.N. Mayonnaises. Sankt-Peterburg: GIORД, 2000. 80 p. (in Russian).

7. Belozerov D.N. Washing and disinfection: from problem to solution // *Pishchevaya promyshlennost*. 2002. No. 10. P. 10–11 (in Russian).

8. NTP 53-91 Norms of technological design for the production of mayonnaise. Moskva: Gipropishcheprom, 1991. 74 p. (in Russian).

9. Haas M.J., Bloomer S., Scott K. Simple, high-efficiency synthesis of fatty acid methyl esters from soapstock // *Journal of the American Oil Chemists’ Society*. 2000. V. 77. No. 4. P. 373–379.

10. GOST 31762-2012. Mayonnaise and sauces mayonnaise. Acceptance rules and test methods. Moskva: Standartinform, 2014. 7 p. (in Russian).

11. Nechaev A.P., Traubenberg S.E., Kochetkova A.A. Food chemistry. Sankt-Peterburg: GIORД, 2003. 640 p. (in Russian).

12. Tarasova L.I., Nosovitskaya F.P., Tagieva T.G., Zavadskaya I.M., Zhitskova S.A. To questions about the quality of mayonnaise products // *Pishchevaya promyshlennost*. 2017. No. 10. P. 50–53 (in Russian).

Отклик почвенной цианобактерии *Nostoc paludosum* на действие сульфата меди (II) в присутствии глутатиона восстановленного

© 2019. А. И. Фокина¹, к. б. н., доцент,
Е. И. Лялина², инженер-хроматографист, Л. В. Трефилова³, к. б. н., доцент,
Т. Я. Ашихмина^{1,4}, д. т. н., профессор, г. н. с., зав. лабораторией,

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

²ООО «Нанолек»,

127055, Россия, г. Москва, ул. Бутырский Вал, д. 68/70,

³Вятская государственная сельскохозяйственная академия,
610017, Россия, г. Киров, Октябрьский проспект, д. 133,

⁴Институт биологии Коми НЦ УрО РАН,
167982, Россия, Республика Коми, г. Сыктывкар, ул. Коммунистическая, д. 28,
e-mail: annushka-fokina@mail.ru, nm-flora@rambler.ru

Изучено влияние растворов CuSO_4 с концентрациями ионов Cu^{2+} , равными 1, 2, 3, 4 и 5 мг/дм³, с добавлением трипептида – глутатиона восстановленного (GSH) и без него на почвенную цианобактерию (ЦБ) *Nostoc paludosum* 18. Продолжительность экспозиции культуры с растворами составила 72 часа. В ходе эксперимента наблюдали за формированием биоплёнок ЦБ из гомогената, как за показателем восстановления исходной популяции; измеряли концентрацию растворённого O_2 в суспензиях ЦБ; определяли долю клеток ЦБ, способных к образованию формазана из 2,3,5-трифенилтетразолий хлорида, как показатель жизнеспособности культуры.

Под действием CuSO_4 у культуры ЦБ нарушалась способность к формированию биоплёнок в растворах с концентрациями Cu^{2+} 1 мг/дм³ и более без добавления GSH и при концентрациях Cu^{2+} , равных 3 и более мг/дм³, в присутствии этого трипептида. По изменению концентрации растворённого O_2 не удалось диагностировать токсичность раствора с концентрацией 1 мг Cu^{2+} /дм³ на протяжении всего эксперимента. У раствора с концентрацией 2 мг Cu^{2+} /дм³ через трое суток экспозиции установлена средняя степень токсичности. Среднюю и слабую степени токсичности удалось выявить у растворов с концентрациями Cu^{2+} , равными 3–5 мг/дм³, через сутки экспозиции. С увеличением концентрации Cu^{2+} происходило снижение дегидрогеназной активности ЦБ, по сравнению с контролем, на 50% и более. Растворы с GSH имеют меньшую степень токсичности, чем аналогичные растворы без добавления GSH. Наиболее приемлемой тест-функцией на действие ионов меди (II) с концентрациями их в растворе, превышающими ПДК, является дегидрогеназная активность ЦБ *N. paludosum* с титром $2 \cdot 10^7$ кл./см³.

Ключевые слова: цианобактерии, ионы меди (II), глутатион, токсичность.

The response of soil cyanobacteria *Nostoc paludosum* to the effect of copper(II) sulfate in the presence of the restored glutathione

© 2019. A. I. Fokina¹ ORCID: 0000-0001-8265-8882, E. I. Lyalina² ORCID: 0000-0002-2334-0820,
L. V. Trefilova³ ORCID: 0000-0002-9932-5803, T. Ya. Ashikhmina^{1,4} ORCID: 0000-0003-4919-0047

¹Vyatka State University,

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

²LLC «Nanolek»,

68/70, Butyrsky Val St., Moscow, Russia, 127055,

³Vyatka State Agricultural Academy,

133, Oktyabrsky Prospect, Kirov, Russia, 610017,

⁴Institute of Biology of the Komi Science Centre of the Ural Branch of RAS,

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

e-mail: annushka-fokina@mail.ru, nm-flora@rambler.ru

The effect of CuSO_4 solutions with Cu^{2+} ion concentrations equal to 1, 2, 3, 4, and 5 mg/dm^3 with the addition of reduced glutathione (GSH) and without it to soil cyanobacteria (CB) of *Nostoc paludosum* 18 was studied. The duration of exposure of the culture with solutions was 72 hours. During the experiment, the formation of biofilms of the CB from the homogenate was observed as an indicator of the recovery of the initial population; the concentration of dissolved O_2 in suspensions of the CB was measured; the proportion of CB cells capable of forming formazan from 2,3,5-triphenyltetrazolium chloride was determined as an indicator of the viability of the culture was determined.

Under the action of CuSO_4 , the ability of the culture of CB to form biofilms in solutions was violated with concentrations of Cu^{2+} 1 mg/dm^3 or more without the addition of GSH and at Cu^{2+} concentrations equal to 3 or more mg/dm^3 in the presence of this tripeptide. It was not possible to diagnose the toxicity of the solution with a concentration of 1 $\text{mg Cu}^{2+}/\text{dm}^3$ by changing the concentration of dissolved O_2 throughout the experiment. In a solution with a concentration of 2 $\text{mg Cu}^{2+}/\text{dm}^3$, the average degree of toxicity was established after three days of exposure. The medium and low degrees of toxicity were detected in solutions with Cu^{2+} concentrations of 3–5 mg/dm^3 after one day of exposure. With an increase in the concentration of Cu^{2+} , the dehydrogenase activity of the CB decreased by 50% or more compared to the control. Solutions with GSH are less toxic than similar solutions without the addition of GSH. The most acceptable test function for the action of copper(II) ions with their concentrations in the solution exceeding the MPC is the dehydrogenase activity of the *N. paludosum* CB with a titer of $2 \cdot 10^7$ cells/ cm^3 .

Keywords: cyanobacteria, copper(II) ions, glutathione, toxicity.

Среди объектов химико-экологического исследования интерес представляют соединения меди, так как медь – окислительно-восстановительно активный переходный металл, который может быть как необходимым, так и, в зависимости от условий, токсичным для биоты [1]. К числу организмов, присутствие и биохимический статус которых отражает состояние окружающей среды (ОС), относятся почвенные цианобактерии (ЦБ). Отклик почвенных ЦБ на действие токсикантов на физиолого-биохимическом уровне может служить сигналом о загрязнении ОС уже тогда, когда реакция многих других тест-организмов, в частности, высших растений, ещё не позволяет судить о токсичности [2].

Существование в виде биоплёнок (БП) – одна из стратегий адаптации популяции микроорганизмов (МО) к условиям ОС. Процесс образования БП характерен и для ЦБ [3]. Образование БП может идти за счёт непосредственного (физического) контакта между организмами; выработки диффундирующих в среде химических сигнальных агентов (например, диффузные химические агенты коммуникации МО – пептиды, лактоны, аминокислоты и т. д.); генерации тех или иных физических полей. Все три канала коммуникации, вероятно, принимают участие в «чувстве кворума» и могут быть реализованы только при оптимальной плотности МО [4]. Адаптационные способности ЦБ могут быть обусловлены наличием в их околочлесточной слизи гетеротрофных спутников, которые по количеству и видовому разнообразию не постоянны, их состав может меняться в зависимости от особенностей экотопа. ЦБ «рекрутируют» в свой слизистый чехол бактерии, необходимые для их существования в конкретных условиях [5]. Таким образом, способность образо-

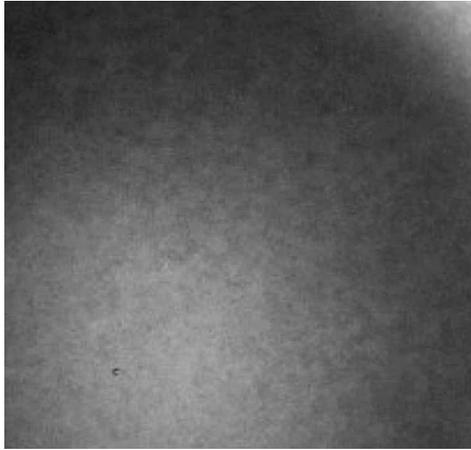
вывать БП обусловлена целым рядом факторов, в том числе присутствием в среде обитания ЦБ ионов металлов, в частности Cu^{2+} . Кроме того, ионы тяжёлых металлов (ТМ) влияют на процессы, связанные с поглощением и выделением O_2 у организмов [6, 7]. Поэтому изменение концентрации O_2 относительно контроля может быть испытано как тест-функция для определения токсичности растворов.

В результате экспериментов с фосфорсодержащими автошампунями [8], соединениями ТМ, хлоридом натрия, нефтепродуктами, пестицидами [9, 10] установлено, что по мере увеличения концентрации токсиканта происходит уменьшение доли жизнеспособных клеток с одновременным ростом процента мёртвых [11]. Данный показатель признан одним из наиболее надёжных для оценки токсичности исследуемой среды [10, 12].

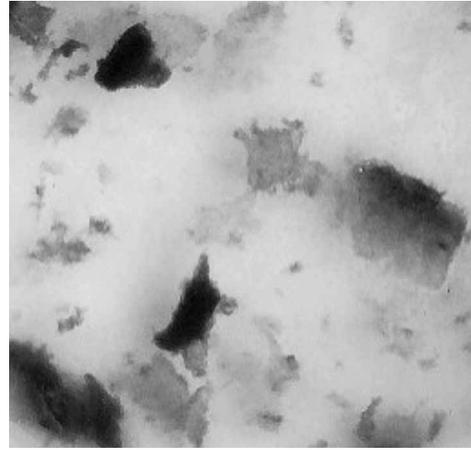
Влияние ионов меди (II) в монорастворах может существенно отличаться от эффекта воздействия ионов металла в присутствии других веществ, в частности, таких природных биопротекторов, как глутатион (GSH) [13]. Поэтому целью работы было исследование возможности использования параметров физиологических и биохимических процессов почвенной цианобактерии *Nostoc paludosum* 18 в качестве тест-функций для диагностики токсичности растворов сульфата меди (II) в присутствии глутатиона восстановленного.

Объекты и методы исследования

Исследовано влияние CuSO_4 на способность ЦБ к формированию БП из гомогенизированного состояния, изменение концентрации растворённого молекулярного кислорода (O_2) в суспензии ЦБ и жизнеспособность кле-



А



В

Рис. 1. Внешний вид суспензии культуры *N. paludosum*: в виде гомогената – А, в виде биоплёнки – В
Fig. 1. The appearance of the suspension of the culture of *N. paludosum*: А – in the form of a homogenate, В – in the form of a film

ток *N. paludosum*. Для этого культуру почвенной ЦБ (выделена из дерново-подзолистой почвы Кировской области) выращивали на безазотистой среде Громова № 6 в течение трёх месяцев. В течение этого времени культура ЦБ образовала мощную БП, которую для проведения эксперимента гомогенизировали в течение двух минут с помощью гомогенизатора марки HG-15A-Set-A (DAIHAN Scientific, Ю. Корея) при 30 тыс. об./мин. Титр культуры в растворах составил $2 \cdot 10^7$ кл./см³. Суспензию ЦБ вносили в растворы CuSO₄ с концентрациями ионов Cu²⁺ равными 1, 2, 3, 4 и 5 мг/дм³, что соответствует 1, 2, 3, 4 и 5 ПДК меди в питьевой воде [14], и в растворы с аналогичными концентрациями ионов Cu²⁺, но с добавлением GSH в мольном соотношении 1Cu²⁺:4GSH. Использовали GSH производства фирмы AppliChem GmbH (Германия). Продолжительность эксперимента – 72 часа. В качестве признака, указывающего на формирование БП, использовали появление скоплений МО, устойчивых к лёгкому перемешиванию суспензии стеклянной палочкой. За процессом формирования БП наблюдали на протяжении всего эксперимента. На фото представлен внешний вид культуры в виде гомогената (рис. 1А) и БП (рис. 1В).

Концентрацию растворённого O₂ в суспензии ЦБ измеряли через 1, 24, 48, 72 часа с начала эксперимента методом амперометрии с помощью прибора марки HI 9143 (HANNA Instruments, Германия). Степень токсичности (%) рассчитывали по формуле:

$$A = (X_{\text{ср.к.}} - X_{\text{ср.оп.}}) / X_{\text{ср.к.}} \cdot 100,$$

где X_{ср.к.} – среднеарифметическое значение концентрации растворённого O₂ в контрольном варианте, мг/дм³; X_{ср.оп.} – среднеарифметическое значение концентрации растворённого O₂ в опытном варианте, мг/дм³.

Если A < 10% – проба не оказывает токсического действия; от 10 до 25% – проба оказывает слабое токсическое действие; от 25 до 35% – среднее токсическое действие, от 35 до 50% – токсическое, > 50% – пробу считают высокотоксичной [15].

Жизнеспособность культуры, подвергшейся влиянию солей меди(II) в течение 24 и 72 часов, определяли тетразольно-топографическим методом прямого счёта клеток ЦБ с кристаллами формазана, используя микроскоп марки Micros (Австрия) [12]. За критерий токсичности принимали снижение доли клеток с кристаллами формазана более, чем на 50%, по сравнению с контролем.

Результаты и обсуждение

Способность культуры ЦБ образовывать биоплёнки. В вариантах без добавления GSH под действием сульфата меди(II) у культуры ЦБ *N. paludosum* нарушалась способность к образованию БП из гомогената. С увеличением концентрации Cu²⁺ эффект от воздействия токсиканта усиливался. Так, если в вариантах с концентрациями ионов Cu²⁺ 1 и 2 мг/дм³ зачатки БП образовывались в течение первых суток, то в вариантах с концентрациями ионов Cu²⁺ от 3 до 5 мг/дм³ МО оставались в состоянии гомогената на протяжении всего эксперимента. Ионы Cu²⁺, оказывая как прямое (бло-

кирование связующих звеньев внешнего полисахаридного слоя слизи ЦБ за счёт образования связей между ионами металла и функциональными группами соединений слоя), так и опосредованное действие (влияние на процессы образования сигнальных и связующих веществ), нарушали процесс формирования БП ЦБ. О насыщении полигликанового слоя ионами Cu^{2+} свидетельствовала окраска гомогената. В вариантах с концентрациями Cu^{2+} , равными 4 и 5 мг/дм³, без добавления GSH гомогенат имел неестественную для культуры окраску, характерную для соединений меди (II).

Добавление GSH положительно сказалось на образовании БП за счёт связывания ионов Cu^{2+} в комплексы с GSH [16], и тем самым, не давая ионам металла связываться с компонентами клеток МО. В присутствии GSH в вариантах с концентрациями ионов Cu^{2+} , равными 1 и 2 мг/дм³, уже в течение первых суток образовались фрагменты БП по размерам приближающиеся к таковым в контрольном варианте. С увеличением концентрации Cu^{2+} биопротекторное действие GSH снижалось. В вариантах с концентрациями ионов Cu^{2+} 3 и 4 мг/дм³ наблюдали образование БП, но меньшего размера и в меньших количествах, чем в вариантах, в которых concentra-

ция Cu^{2+} 1 и 2 мг/дм³. В варианте с концентрацией Cu^{2+} 5 мг/дм³ БП не обнаружено даже к концу эксперимента.

Таким образом, использование гомогената ЦБ с титром $2 \cdot 10^7$ кл./см³ позволило диагностировать токсичность по способности МО к формированию БП через сутки экспозиции во всех вариантах без GSH, в присутствии GSH – при концентрациях Cu^{2+} более 2 мг/дм³.

Временная динамика концентрации O_2 в суспензиях ЦБ. Измерение концентрации растворённого O_2 в суспензиях ЦБ показало, что в варианте без внесения $CuSO_4$ и GSH (контроль) этот показатель увеличился на 1,0 мг/дм³ (9,5% от начального) в течение 72 часов в результате фотосинтеза у ЦБ [17]. В варианте с концентрацией ионов Cu^{2+} , равной 1 мг/дм³, увеличение концентрации O_2 сопоставимо с контролем (0,8 мг/дм³ – 8,3% от начального) (рис. 2А), что позволило говорить об отсутствии токсического влияния ионов Cu^{2+} при данной концентрации на *N. paludosum*. Количество O_2 в суспензиях, содержащих ионы Cu^{2+} в дозах, равных 2–5 мг/дм³, через трое суток уменьшилось на 2,2–4,7 мг/дм³ (22,0–45,5% от начального). Между величинами концентраций ионов Cu^{2+} и растворённого O_2 выявлена достаточно тесная обратная взаимосвязь (табл.).

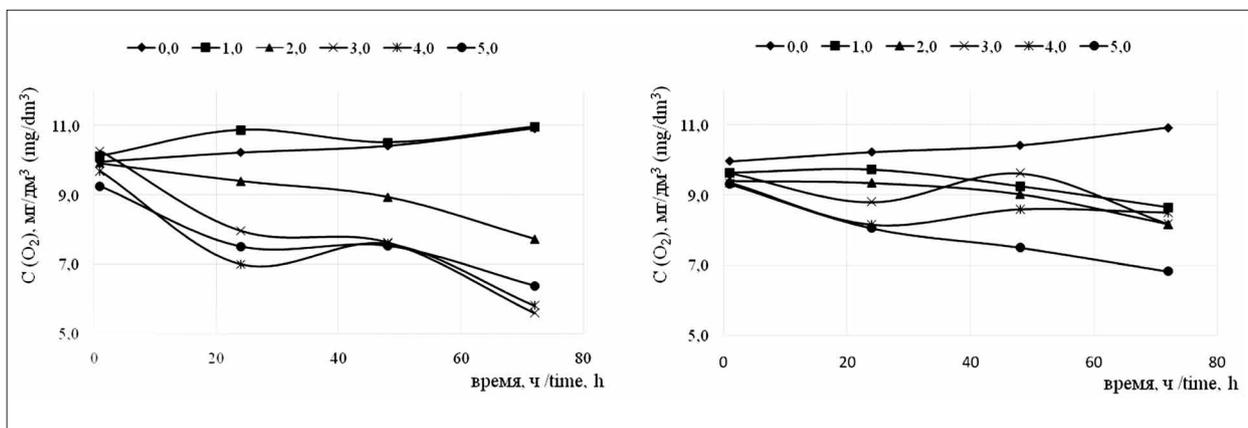
Таблица / Table

Степень токсичности растворов, % / Degree of toxicity of solutions, %

C (Cu^{2+}), мг/дм ³ C (Cu^{2+}), mg/dm ³	Мольное отношение Mole ratio Cu:GSH	Продолжительность эксперимента, час Duration of the experiment, hour			
		1	24	48	72
1	1Cu:0GSH	-1,6	-6,4	-1,0	-0,5
	1Cu:4GSH	3,2	4,8	11,1*	20,8*
2	1Cu:0GSH	0,5	8,1	14,1*	29,2**
	1Cu:4GSH	5,6	8,6	13,4*	25,2**
3	1Cu:0GSH	3,0	22,1*	26,7**	48,7***
	1Cu:4GSH	3,3	13,9*	17,6*	25,0**
4	1Cu:0GSH	2,8	31,5**	27,1**	46,8***
	1Cu:4GSH	6,2	20,2*	17,5*	22,1*
5	1Cu:0GSH	7,1	26,5**	27,7**	41,5***
	1Cu:4GSH	6,5	21,2*	28,0**	37,5***
R(Cu^{2+}/O_2)					
(без GSH/ с GSH) (without GSH/ with GSH)		-0,67/-0,85	-0,91/-0,99	-0,92/-0,87	-0,87/-0,84

Примечание: Количество «*» указывает на степень токсичности пробы: отсутствие – нетоксичная, «*» – слаботоксичная, «**» – среднетоксичная, «***» – токсичная. Коэффициент корреляции (R) между концентрациями ионов меди (II) в растворе и растворённого молекулярного кислорода рассчитан в программе Excel.

Note: The number «*» indicates the degree of toxicity of the sample: no – non-toxic, «*» – slightly toxic, «**» – medium-toxic, «***» – toxic. The correlation coefficient (R) between the concentrations of copper(II) ions in solution and dissolved molecular oxygen is calculated in Excel.



А

В

Рис. 2. Динамика концентрации O_2 в водных суспензиях *N. paludosum* с различной концентрацией Cu^{2+} (1,0; 2,0; 3,0; 4,0; 5,0 мг/дм³): А – без добавления GSH, В – с добавлением GSH в мольном соотношении 1Cu:4GSH

Fig. 2. Dynamics of O_2 concentration in aqueous suspensions of *N. paludosum* with different concentrations of Cu^{2+} (1.0, 2.0, 3.0, 4.0, 5.0 mg/dm³):

A – without addition of GSH, B – with addition of GSH in the molar ratio 1Cu: 4GSH

Добавление GSH в суспензии, содержащие Cu^{2+} 1, 2, 3 и 4 мг/дм³ до мольного соотношения 1Cu:4GSH, привело к снижению концентрации O_2 через трое суток экспозиции на 0,9–1,5 мг/дм³ (8,7–15,1% от начального) (рис. 2Б). В варианте с 5 мг Cu^{2+} /дм³ в присутствии GSH концентрация O_2 снизилась за это же время на 2,5 мг/дм³ (26,7% от начального). Снижение концентрации растворённого O_2 в суспензии может быть следствием как снижения активности окислительного фотосинтеза, так и расхода O_2 на процесс образования активных форм кислорода, спровоцированный появлением в растворе медьсодержащих комплексов глутатиона [18]. Между величинами концентраций ионов Cu^{2+} и растворённого O_2 в присутствии GSH выявлена тесная обратная взаимосвязь (табл. 1).

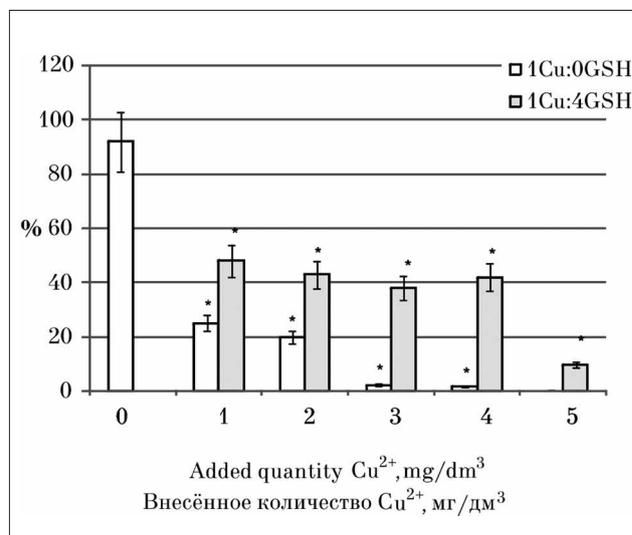
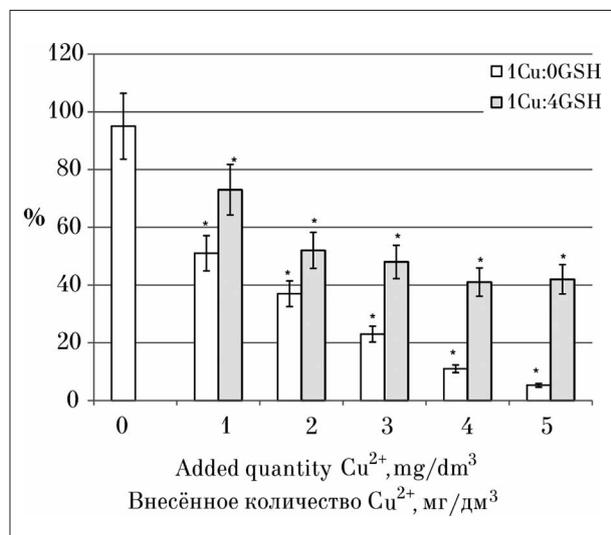
Несмотря на тесную взаимосвязь между концентрациями Cu^{2+} и O_2 (табл.), не удалось диагностировать токсичность раствора с концентрацией ионов Cu^{2+} , равной ПДК (1 мг/дм³), на протяжении всего эксперимента. Средняя токсичность диагностирована в растворе, имеющем концентрацию иона металла в два раза превышающую ПДК (2 мг/дм³), только через 72 часа экспозиции ЦБ с раствором. Статус «слабая токсичность» и «средняя токсичность» появился у растворов с концентрациями Cu^{2+} , в 3–5 раз превышающими ПДК после их контакта с ЦБ в течение суток (табл. 1).

Внесение GSH привело к снижению степени токсичности растворов, однако не позволило перевести ни один из вариантов в статус «нетоксичный».

Влияние $CuSO_4$ на жизнеспособность *Nostoc paludosum*. С увеличением концентрации ионов Cu^{2+} в растворе у культуры ЦБ снижалась дегидрогеназная активность ($R_{1\text{сут}} = -0,94$; $R_{3\text{сут}} = -0,83$ при $n = 3$ и $P = 0,95$). Следствием этого стало сокращение доли клеток ностока, способных восстанавливать 2,3,5-трифенилтетразолия хлорид (ТТХ) до формазана (рис. 3). Добавление GSH привело к ослаблению токсического действия сульфата меди (II) на культуру ЦБ и, как следствие, к снижению взаимосвязи между концентрацией Cu^{2+} и долей клеток ЦБ с кристаллами формазана ($R_{1\text{сут}} = -0,78$; $R_{3\text{сут}} = -0,70$) (рис. 3). Однако независимо от присутствия GSH, ионы Cu^{2+} во всех вариантах, кроме варианта с концентрацией Cu^{2+} 1 мг/дм³, вызвали снижение количества жизнеспособных клеток ЦБ по сравнению с контролем на 50% и более уже через сутки экспозиции (рис. 3А). Через трое суток жизнеспособность цианобактериальных клеток во всех вариантах существенно снизилась по сравнению с суточной экспозицией, а доля клеток с кристаллами формазана не превышала 50% во всех вариантах (рис. 3В). Данное обстоятельство указывает на токсичность всех медьсодержащих вариантов растворов.

Заключение

Установлено, что под действием сульфата меди (II) у культуры ЦБ *N. paludosum* нарушается способность к формированию БП из гомогената. С помощью данного показателя удаётся выявить превышение ПДК Cu^{2+} в растворе, не



А

В

Рис. 3. Доля (%) клеток с кристаллами формазана в культуре ЦБ *N. paludosum*: А – 24 часа, В – 72 часа; «*» – результаты достоверно отличаются от контроля при $P \geq 0,95$
Fig. 3. Proportion (%) of cells with crystals of formazan in culture of CB *N. paludosum*: А – 24 hours, В – 72 hours; «*» – the results are significantly different from the control at $P \geq 0,95$

содержащем GSH. Глутатион оптимизирует процесс образования БП, поэтому нарушение процесса образования БП в вариантах, в которых он присутствует, наблюдали при концентрациях Cu^{2+} 3 мг/дм³ и более.

По изменениям концентрации растворённого O_2 не удалось диагностировать токсичность в растворах с концентрацией Cu^{2+} равной 1 мг/дм³. При концентрации Cu^{2+} 2 мг/дм³ через 72 часа контакта ЦБ с раствором токсиканта диагностирована средняя токсичность. Через сутки экспозиции ЦБ с растворами, в которых концентрации Cu^{2+} превышают ПДК для питьевой воды в 3–5 раз (3–5 мг Cu^{2+} /дм³ соответственно) установлена слабая и средняя степени токсичности. Присутствие GSH снижает степень токсичности растворов сульфата меди(II).

С увеличением концентрации Cu^{2+} происходит снижение дегидрогеназной активности *N. paludosum* по сравнению с контролем и, как следствие, снижается доля клеток, способных восстанавливать ТТХ до формазана (50% клеток с формазаном в варианте 1 мг Cu^{2+} /дм³, менее 50% клеток с формазаном в вариантах, где $C(\text{Cu}^{2+}) \geq 2$ мг/дм³). Введение GSH в суспензию ЦБ приводит к снижению токсичности растворов CuSO_4 , так в варианте с концентрацией Cu^{2+} 1 мг/дм³ после суточной экспозиции доля клеток с кристаллами формазана составляет 70%.

Исходя из результатов экспериментов установлено, что наиболее перспективной

тест-функцией при определении токсичности растворов солей меди(II) является жизнеспособность клеток ЦБ *N. paludosum*. Такие показатели, как способность к формированию БП и изменение концентрации растворённого кислорода в суспензии ЦБ оказались менее чувствительными.

Работа выполнена в рамках государственного задания Вятского государственного университета по теме «Механизмы адаптации и устойчивости почвенной микробиоты к техногенному загрязнению» № 5.4962.2017/БЧ.

Литература

1. Yadav P., Kaur R., Kanwar M.K., Bhardwaj R., Sirhindi G., Wijaya L., Alyemeni M.N., Ahmad P. Ameliorative role of castasterone on copper metal toxicity by Improving redox homeostasis in *Brassica juncea* L. // Journal of Plant Growth Regulation. October 2017. P. 1–16.
2. Фокина А.И., Дабах Е.В., Домрачева Л.И., Скугорева С.Г., Лялина Е.И., Ашихмина Т.Я., Зыкова Ю.Н., Леонова К.А. Методические подходы к химико-биологической диагностике состояния почв техногенно-преобразованных территорий // Почвоведение. 2018. № 5. С. 589–600. doi: 10.7868/S0032180X18050088
3. Кондакова Л.В., Горностаева Е.А., Домрачева Л.И. Самосборка природных биоплёнок с доминированием *Nostoc commune* // Биологический мониторинг природно-техногенных систем: Материалы Всерос. науч.-практ. конф. с междунар. участием. Ч. 2. Киров: ООО «Лобань», 2014. С. 169–174.

4. Олескин А.В., Ботвиненко И.В., Цавкелова Е.А. Колониальная организация и межклеточная коммуникация у микроорганизмов // Микробиология. 2000. Т. 69. № 3. С. 309–327.

5. Панкратова Е.М., Трефилова Л.В., Зяблых Р.Ю., Устюжанин И.А. Цианобактерия *Nostoc paludosum* Kütz как основа для создания агрономически полезных микробных ассоциаций на примере бактерий р. *Rhizobium* // Микробиология. 2008. Т. 77. № 2. С. 266–272.

6. Хоботьев В.Г., Капков В.И. Влияние полиметаллических руд на выделение и поглощение кислорода в процессе фотосинтеза и дыхания протококковых водорослей // Биологические науки. 1968. № 4. С. 82–85.

7. Kulikova A.L., Kuznetsova N.A., Burmistrova N.A. Change in growth and physiological parameters in soybean seedlings in response to toxic action of copper // Russian Journal of Plant Physiology. 2015. V. 62. No. 4. P. 455–464.

8. Симакова В.С., Домрачева Л.И., Огородникова С.Ю., Фокина А.И., Ашихмина Т.Я. Влияние фосфорсодержащих автошампуней на развитие почвенных цианобактерий // Теоретическая и прикладная экология. 2016. № 3. С. 89–94. doi: 10.25750/1995-4301-2016-3-089-094

9. Огородникова С.Ю., Зыкова Ю.Н., Березин Г.И., Домрачева Л.И., Калинин А.А. Комплексная оценка состояния цианобактерий *Nostoc paludosum* 18 при воздействии различных поллютантов // Теоретическая и прикладная экология. 2010. № 3. С. 47–51. doi: 10.25750/1995-4301-2010-3-047-051

10. Домрачева Л.И., Ашихмина Т.Я., Кондакова Л.В., Березин Г.И. Реакция почвенной биоты на действие пестицидов (обзор) // Теоретическая и прикладная экология. 2012. № 3. С. 4–18. doi: 10.25750/1995-4301-2012-3-004-018

11. Домрачева Л.И., Кондакова Л.В., Фокина А.И., Огородникова С.Ю., Кантор Г.Я. Биомониторинг и биотестирование почв // Биоиндикаторы и биотестсистемы в оценке окружающей среды техногенных территорий / Под ред. Т.Я. Ашихминой, Н.М. Алалыкиной. Киров, 2008. С. 68–105.

12. Фокина А.И., Домрачева Л.И., Зыкова Ю.Н., Скугорева С.Г., Лялина Е.И., Трефилова Л.В. Совершенствование тетразольно-топографической методики биотестирования с использованием цианобактерий // Теоретическая и прикладная экология. 2017. № 1. С. 31–41. doi: 10.25750/1995-4301-2017-1-031-041

13. Burkhead J.L., Reynolds K.A.G., Abdel-Ghany S.E., CoHu Ch.M., Pilon M. Copper homeostasis // New phytologist. 2009. V. 182. No. 4. P. 799–816. doi: 10.1111/j.1469-8137.2009.02846.x

14. СанПиН 2.1.4.1074-01. Питьевая вода. Гигиенические требования к качеству воды централизованных систем питьевого водоснабжения. Контроль качества. Гигиенические требования к обеспечению безопасности систем горячего водоснабжения. М.: Минздрав России, 2002. 46 с.

15. ГОСТ Р 53910-2010 Вода. Методы определения токсичности по замедлению роста морских одноклеточных водорослей *Phaeodactylum tricornutum* Bohlin и *Skeletonema costatum* (Greville) Cleve. М.: Стандартинформ, 2010. 38 с.

16. Hossain M.A., Piyatida P., da Silva J.A.T., Fujita M. Molecular mechanism of heavy metal toxicity and tolerance in plants: central role of glutathione in detoxification of reactive oxygen species and methylglyoxal and in heavy metal chelation // Journal of Botany. 2012. V. 2012. P. 1–37. doi: 10.1155/2012/872875

17. Громов Б.В. Цианобактерии в биосфере // Соросовский образовательный журнал. 1996. № 9. С. 33–39.

18. Скурлатов Ю.И., Дука Г.Г., Мизити А. Введение в экологическую химию М.: Высшая школа, 1994. 400 с.

References

1. Yadav P., Kaur R., Kanwar M.K., Bhardwaj R., Sirhindi G., Wijaya L., Alyemni M.N., Ahmad P. Ameliorative role of castasterone on copper metal toxicity by Improving redox homeostasis in *Brassica juncea* L. // Journal of Plant Growth Regulation. October 2017. P. 1–16. doi: 10.1007/s00344-017-9757-8

2. Fokina A.I., Dabakh E.V., Domracheva L.I., Skugoreva S.G., Lyalina E.I., Ashikhmina T.Ya., Zyкова Yu.N., Leonova K.A. Methodological approaches toward chemico-biological diagnostics of the state of soils in technogenically transformed territories // Pochvovedenie. 2018. No. 5. P. 589–600 (in Russian). doi: 10.7868/S0032180X18050088

3. Kondakova L.V., Gornostaeva E.A., Domracheva L.I. Self-assembly of natural biofilms dominated by *Nostoc commune* // Biological monitoring of natural and man-made systems: Materialy Vseros. nauch.-prakt. konf. s mezhdunar. uchastiem. Ch. 2. Киров: Loban, 2011. P. 169–174 (in Russian).

4. Oleskin A.V., Botvinenko I.V., Tsavkelova E.A. Colonial organization and intercellular communication in microorganisms // Mikrobiologiya. 2000. T. 69. No. 3. P. 309–327 (in Russian).

5. Pankratova E.M., Trefilova L.V., Zyablykh R.Yu., Ustyuzhanin I.A. *Nostoc paludosum* Kütz cyanobacterium as a basis for creating agronomically beneficial microbial associations using the example of p. *Rhizobium* // Mikrobiologiya. 2008. V. 77. No. 2. P. 266–272 (in Russian).

6. Khobotev V.G., Kapkov V.I. Influence of polymetallic ores on the release and absorption of oxygen in the process of photosynthesis and respiration of proto-coccal algae // Biologicheskie nauki. 1968. No. 4. P. 82–85 (in Russian).

7. Kulikova A.L., Kuznetsova N.A., Burmistrova N.A. Change in growth and physiological parameters in soybean seedlings in response to toxic action of copper // Russian Journal of Plant Physiology. 2015. V. 62. No. 4. P. 455–464. doi: 10.1134/S1021443715040111

8. Simakova V.S., Domracheva L.I., Ogorodnikova S.Yu., Fokina A.I., Ashikhmina T.Ya. The effect of phosphorus-containing car shampoos on the development of soil cyanobacteria // *Theoretical and Applied Ecology*. 2016. No. 3. P. 89–94 (in Russian). doi: 10.25750/1995-4301-2016-3-089-094
9. Ogorodnikova S.Yu., Zykova Yu.N., Berezin G.I., Domracheva L.I., Kalinin A.A. Comprehensive assessment of the state of cyanobacteria *Nostoc paludosum* 18 when exposed to various pollutants // *Theoretical and Applied Ecology*. 2010. No. 3. P. 47–51 (in Russian). doi: 10.25750/1995-4301-2010-3-047-051
10. Domracheva L.I., Ashikhmina T.Ya., Kondakova L.V., Berezin G.I. The reaction of soil biota to the action of pesticides (review) // *Theoretical and Applied Ecology*. 2012. No. 3. P. 4–18. doi: 10.25750/1995-4301-2012-3-004-018
11. Domracheva L.I., Kondakova L.V., Fokina A.I., Ogorodnikova S.Yu., Kantor G.Ya. Soil biomonitoring and biotesting // *Bioindicators and biotest systems in environmental assessment of technogenic territories* / Eds. T.Ya. Ashikhmina, N.M. Alalykina. Kirov, 2008. P. 68–105 (in Russian).
12. Fokina A.I., Domracheva L.I., Zykova Yu.N., Skugoreva S.G., Lyalina E.I., Trefilova L.V. Improving the tetrazole-topographic biotesting technique using cyanobacteria // *Theoretical and Applied Ecology*. 2017. No. 1. P. 31–41 (in Russian). doi: 10.25750/1995-4301-2017-1-031-041
13. Burkhead J.L., Reynolds K.A.G., Abdel-Ghany S.E., Cochu Ch.M., Pilon M. Copper homeostasis // *New phytologist*. 2009. V. 182. No. 4. P. 799–816. doi: 10.1111/j.1469-8137.2009.02846.x
14. SanPiN 2.1.4.1074-01. Drinking water. Hygienic requirements for water quality of centralized drinking water supply systems. Quality control. Hygienic requirements for ensuring the safety of hot water systems. Moskva: Minzdrav Rossii, 2002. 46 p.
15. GOST R 53910-2010. Water. Methods for the determination of toxicity to slow the growth of marine unicellular *Phaeodactylum tricornutum* Bohlin and *Skeletonema costatum* (Greville) Cleve. Moskva: Standartinform, 2010. 38 p.
16. Hossain M.A., Piyatida P., da Silva J.A.T., Fujita M. Molecular mechanism of heavy metal toxicity and tolerance in plants: central role of glutathione in detoxification of reactive oxygen species and methylglyoxal and in heavy metal chelation // *Journal of botany*. 2012. V. 2012. Article ID 872875. 37 p. doi: 10.1155/2012/872875
17. Gromov B.V. Cyanobacteria in the biosphere // *Sorosovskiy obrazovatelnyy zhurnal*. 1996. No. 9. P. 33–39 (in Russian).
18. Skurlatov Yu.I., Duka G.G., Miziti A. Introduction to environmental chemistry. Moskva: Vysshaya shkola, 1994. 400 p. (in Russian).

Белковые спектры печени живородки речной в норме и при интоксикации ионами свинца (II)

© 2019. Т. С. Дроганова, ст. преподаватель,
Л. В. Поликарпова, н. с., А. С. Коницев, д. б. н., профессор, с. н. с.,
Московский государственный областной университет,
141014, Россия, Московская обл., г. Мытищи, ул. Веры Волошиной, д. 24,
e-mail: ecolab@mgou.ru

В статье рассмотрены некоторые аспекты метаболических изменений у гидробионтов в результате сублетального токсического воздействия. В остром токсикологическом эксперименте исследовано воздействие катионов Pb^{2+} на активность кислой фосфатазы (КФ), кислой ДНКазы живородки речной. Впервые выявлены изменения в спектре растворимых белков печени моллюска под воздействием тяжёлых металлов, а также определены молекулярные массы белков. На протяжении исследованного периода экспозиции (96 ч) с токсикантами выявлены колебательные изменения в удельной активности ферментов по сравнению с контрольной группой моллюсков. Характер изменения активности ферментов указывает на адаптационные процессы в организме моллюсков. Максимальный прирост активности наблюдается в первые сутки экспозиции, после чего практически не наблюдается отличий между контрольной и опытной группами. Сходные результаты были обнаружены для ДНКазы. Мы предполагаем, что повышение удельной активности ферментов связано с разрушением эндогенного ингибитора нуклеаз и фосфатаз. В спектрах растворимых белков, начиная с 6–12 ч экспозиции, обнаружено появление белковых фракций, индуцированное токсическим воздействием. Среди данных белков, вполне вероятно, присутствуют металлотioneин-подобные протеины. При электрофорезе с SDS обнаружены полипептиды с молекулярной массой 11–20 кДа, что соотносится с молекулярной массой металлотioneинов беспозвоночных животных. Полученные нами данные свидетельствуют о глубокой перестройке в наборах белков печени живородки речной при интоксикации ионами Pb^{2+} .

Ключевые слова: живородка речная, токсическое воздействие, белки, ферменты, металлотioneины.

River snail liver protein spectrum in normal conditions and when intoxicated with lead (II) ions

© 2019. T. S. Droganova ORCID: 0000-0002-8917-7392*
L. V. Polikarpova ORCID: 0000-0002-5459-3054* A. S. Konichev ORCID: 0000-0002-7074-805X*
Moscow State Regional University,
24, Very Voloshinoy St., Mytishi, Moscow region, Russia, 141014,
e-mail: ecolab@mgou.ru

Several aspects of metabolic changes of hydrobionts as a result of sublethal toxic effect are described in the current article. In an acute toxicological experiment, the effect of the Pb^{2+} cations on the activity of acid phosphatase, and acid DNase. Changes in the spectrum of soluble liver proteins of the river snail by exposure to heavy metals are detected for the first time. The molecular masses of proteins were determined. During the investigated period of exposure (96 h) with toxicants, changes in the specific activity of enzymes were revealed in comparison with the control group of mollusks. The nature of changes in enzyme activity indicates the adaptation processes in the snail's body. The maximum increase of acid phosphatase activity is observed in the first day of exposure, after the values practically do not differ from the control. Similar results were obtained for the acid DNase. We assume that the increase in the specific activity of enzymes is associated with the destruction of the endogenous inhibitor of DNase and phosphatases. In the spectra of soluble proteins, starting from 6–12 hours of exposure, the appearance of protein fractions induced by toxic effects was found. Based on the analysis of protein spectra we determined that among these proteins, it is likely that metallothionein-like proteins are presented. During electrophoresis in denaturing conditions with SDS, a polypeptide with a molecular mass of 11 kDa was found, which correlates with the molecular weight of animals' metallothioneins. The data we obtained indicate a profound reorganization of snail's liver protein sets during toxic effect of Pb(II).

Keywords: river snail, toxic effects, proteins, enzymes, metallothioneines.

Многие токсические вещества могут длительное время сохраняться в воде, накапливаться в донных отложениях и гидробион-

тах. Такой способностью обладают тяжёлые металлы (ТМ), хлорорганические пестициды и др.

В числе других ТМ свинец извлекается из донных отложений и накапливается гид-робионтами [1]. Повышение содержания свинца в открытых водоёмах связано с выбросами автотранспорта, выносом в водные объекты сточных вод рудообогатительных фабрик, металлургических и металлообрабатывающих заводов, химических производств и др. [2].

Известно, что соединения свинца нарушают обмен веществ, изменяя структуру внутриклеточных мембран, затрудняют образование вторичной структуры белков и являются ингибиторами некоторых ферментов, связываясь с остатками цистеина в HS-содержащих ферментах [3]. Также ионы Pb^{2+} образуют устойчивые комплексы с карбонильными и фосфатными группами белков, тем самым нарушая их нормальный метаболизм. С другой стороны, ТМ являются индукторами синтеза специфических защитных белков – металло-тионеинов [4]. Ранее было изучено воздействие ряда ТМ на активность протеаз, фосфатаз и рибонуклеаз моллюсков [5–7], тогда как изменения в наборах растворимых белков моллюсков под воздействием ТМ долгое время оставались не изучены в связи со сложностью их фракционирования и выявления.

Ранее нами были отработаны условия выявления спектров растворимых белков моллюсков при электрофорезе в полиакриламидном геле (ПААГ) и установлены происходящие в них изменения под воздействием фторсодержащих соединений [8] в связи с возрастанием их содержания в поверхностных водах [9], а также предложены подходы к определению молекулярных масс выявленных белков [10].

Целью данной работы стал анализ изменений активности ферментов, играющих важную роль в метаболизме моллюсков, а также спектров растворимых белков живородки речной под влиянием ионов свинца.

Материалы и методы

Материал. Материалом для исследования стали пресноводные моллюски живородка речная (*Viviparus viviparus* L.), ввиду их широкого распространения в водоёмах Европейской части России. Данный вид моллюсков характеризуется широкими возможностями для метаболической адаптации к токсическому воздействию [6–8].

Сбор моллюсков живородки речной (*Viviparus viviparus* L.) проводили в прибрежной зоне реки Вязь Пушкинского района Мо-

сковской области. Акклимацию проводили в течение 2-х недель в аквариуме при температуре, близкой к естественной, с постоянной аэрацией.

Токсикологический эксперимент. Контролем служили особи, содержащиеся в воде без добавления токсиканта при прочих равных условиях в течение тех же временных интервалов. В качестве токсиканта использовали ацетат свинца в концентрации 0,1 мг/л по катиону Pb^{2+} , что соответствует величине 10 ПДК_{вод.} (ПДК_{вод.} составляет 0,01 мг/мл). Выбор концентрации токсиканта обусловлен целью исследования – в более ранних работах установлено, что концентрация, соответствующая 10 ПДК, оптимальна для изучения острого токсического воздействия. При меньшем содержании действующего вещества может не наблюдаться яркого, наглядного результата, а повышенная концентрация зачастую приводит к преждевременной гибели особей [5]. Экспозиция опыта составляла от 2 до 96 ч, при этом было использовано около 150 особей моллюсков. По истечении установленного времени отбирали группы по 5–6 животных и извлекали пищеварительную железу, из которой получали экстракт водорастворимых белков [8]. Все измерения проводились в трёх повторностях. Концентрацию белка в экстрактах определяли по методу Лоури [11].

Определение активности кислой фосфатазы и кислой ДНКазы. Активность кислой фосфатазы (КФ) определяли традиционным методом по скорости гидролиза модельного субстрата *p*-нитрофенилфосфата [12].

Активность дезоксирибонуклеазы (ДНКазы) определяли по скорости гидролиза синтетического олигонуклеотида, меченого парой флуорофоров – репортером и тушителем (аналогично зондам типа TaqMan) по самостоятельно разработанной методике [13].

Удельную активность ферментов рассчитывали в единицах на 1 мг белка (Е/мг белка). Значения активности, полученные для контрольной группы животных, принимали за единицу для более наглядного представления результатов исследования.

Диск-электрофорез. Электрофорез белков проводили в колонках ПААГ по Девису при 4–6 °С. Условия электрофореза были оптимизированы нами специально для исследуемого объекта и детально описаны ранее [8].

Определение молекулярных масс белков. Белки фракционировали при помощи усовершенствованного метода электрофореза в денатурирующих условиях [10]. Молекуляр-

ную массу белковых фракций определяли по калибровочной кривой, маркерными белками служили каталаза печени быка (240 кДа), альдолаза мышц кролика (160 кДа), бычий альбумин (67 кДа), цитохром С (12,3 кДа) и динитрофенилаланин (255 Да).

Результаты и обсуждение

Исследование показало изменение активности КФ и ДНКазы под воздействием ионов свинца(II) (рис. 1), что согласуется с литературными данными об увеличении активности гидролаз у гидробионтов под влиянием токсикантов [14, 15]. Важно отметить, что активность ферментов не остаётся постоянной на протяжении экспозиции ни в одной из групп животных, вследствие естественных метаболических процессов в организме моллюсков. Максимальный прирост активности КФ наблюдается в первые сутки экспозиции, после чего значения практически не отличаются от контрольных, что, вероятно, связано с адаптивными реакциями животных к токсическому воздействию.

Сходные результаты были получены нами и для кислой ДНКазы. Хорошо заметно значительное увеличение активности в интервале экспозиции от 24 до 60 ч, в дальнейшем показатели также сближаются с контрольными. Выявленный характер изменений в активности ДНКазы практически идентичен таковому в отношении кислой РНКазы печени моллюсков [7], что подразумевает сходный механизм реакции нуклеаз моллю-

ска на воздействие свинца. Следует учесть, что ранее нами была выявлена активация протеолитических ферментов в печени живородки речной под воздействием высоких концентраций свинца в первые сутки экспозиции [6], что может приводить к разрушению эндогенного ингибитора ДНКаз и фосфатаз, приводить к распаду комплекса фермент-ингибитор и повышать удельную активность ферментов.

Важные данные были получены нами при исследовании состава нативных белков пищеварительной железы живородки речной (рис. 2). Так, воздействие Pb^{2+} привело к появлению целой группы белковых фракций, отсутствующих в контроле и характеризующихся средней и высокой электрофоретической подвижностью. Наиболее высокоподвижный (низкомолекулярный) белок выявляется с 6 ч до конца экспозиции. Одновременно наблюдается исчезновение высокомолекулярных белковых фракций. Распад высокомолекулярных белков на фоне увеличения протеолитической активности ранее был установлен при воздействии ионов кадмия. Высокой подвижностью при электрофорезе отличаются протеолитические ферменты печени моллюсков [7].

Заключение

Совокупность полученных данных позволяет предположить следующий механизм воздействия свинца, а также, возможно, и других ТМ на метаболизм моллюсков. В начальные часы воздействия свинца происходит

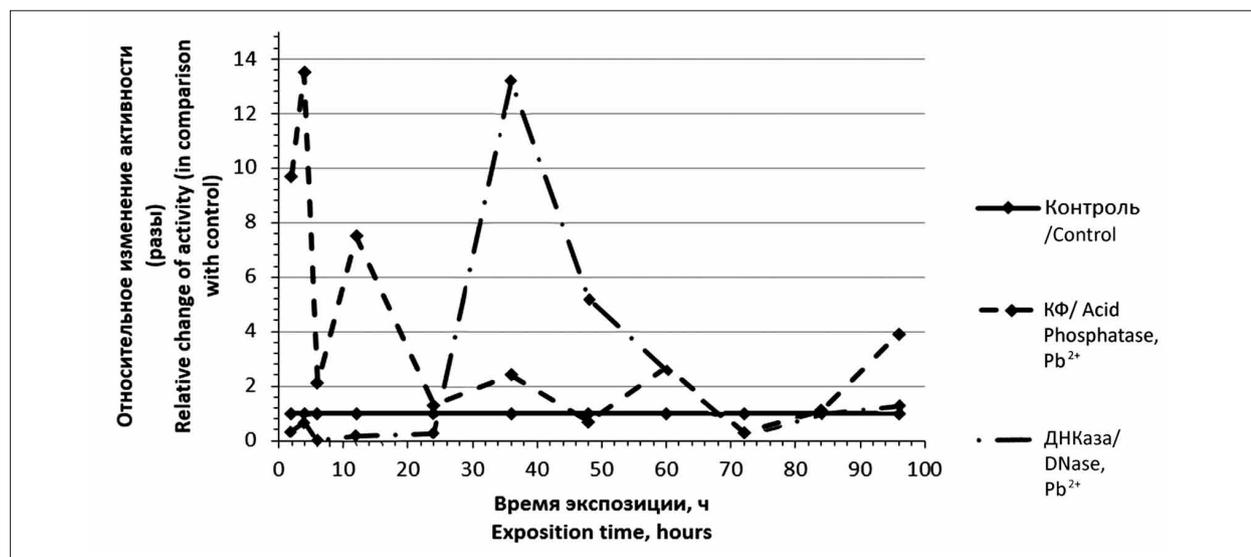


Рис. 1. Изменение удельной активности ферментов в норме и при интоксикации ионами Pb(II)
 Fig. 1. Change of enzymes specific activity in norm and in intoxication by Pb²⁺

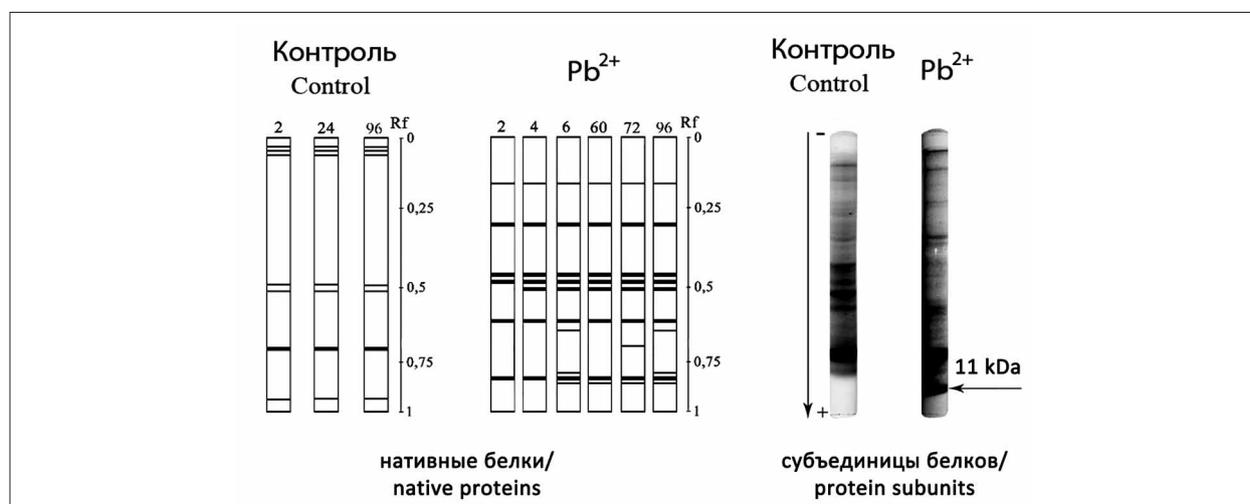


Рис. 2. Электрофореграммы белков из пищеварительной железы живородки речной в норме и при воздействии свинца (II); Rf – относительная электрофоретическая подвижность; 2–96 – время экспозиции с токсикантом (ч)

Fig. 2. Electrophoregrams of hepatopancreas proteins of the river snail in norm and under the influence of Pb²⁺. Rf is relative electrophoretic mobility. Numbers 2–96 indicate the exposure time under the influence of toxicant

Примечание: В контрольной группе особей на протяжении всей экспозиции белковые спектры не изменялись. В группе, находившейся под воздействием Pb²⁺, от 6 до 24 ч экспозиции и от 36 до 60 ч экспозиции были получены одинаковые белковые спектры / Note: In the control group throughout the entire exposure protein spectra did not change. In the group exposed to Pb²⁺ from 6 to 24 hours and from 36 to 60 hours of exposure the same protein spectra were obtained.

разрушение предсуществующего комплекса фермент-ингибитор, что сопровождается распадом высокомолекулярных белков (или их комплексов), и, одновременно, появляются белки со средней и высокой электрофоретической подвижностью. При этом резко увеличивается активность ДНКазы и фосфатазы. Начиная с 6–12 ч экспозиции, накопление свинца в организме моллюсков может вызывать индукцию синтеза группы стрессовых белков, среди которых, вполне вероятно, синтезируются металлотионеинподобные протеины. При электрофорезе с SDS это проявляется в виде полипептида с молекулярной массой 11 кДа (рис. 2), что согласуется с данными по молекулярным массам металлотионеинов беспозвоночных животных [5, 16, 17]. Эти белки начинают активно связывать катионы свинца, и тем самым вновь открывается возможность для нормализации активности ДНКазы и фосфатазы.

Изложенная последовательность событий представляется нам вполне логичной и заслуживает более детального рассмотрения в последующих работах.

Литература

1. Мур Дж.В., Рамамурти С. Тяжёлые металлы в пресноводных водах: Контроль и оценка влияния. М.: Мир, 1987. 288 с.

2. Gorinstein S., Jung S.T., Moncheva S., Arancibia-Avila P., Park Y.S., Kang S.G., Goshev I., Trakhtenberg S., Namiesnik J. Partial characterization of proteins from mussel *Mytilus galloprovincialis* as a biomarker of contamination // *Arcg. Environ. Contam. Toxicol.* 2005. V. 49. No. 4. P. 504–510.

3. Burlando B., Bonomo M., Capri F., Mancinelli G., Pons G., Viarengo A. Different effects of Hg²⁺ and Cu²⁺ on mussel (*Mytilus galloprovincialis*) plasma membrane Ca²⁺-ATPase: Hg²⁺ induction of protein expression // *Comp. Biochem. Physiol. C Toxicol. Pharmacol.* 2004. V. 139. No. 4. P. 201–207.

4. Вредные химические вещества (Неорганические соединения I–IV групп) / Под ред. В.А. Филова. Л.: Химия, 1988. 592 с.

5. Цветков И.Л., Коничев А.С. Биохимические и молекулярно-генетические аспекты адаптации гидробионтов. М.: Изд-во МГОУ, 2013. 122 с.

6. Конин Д.Н., Коничев А.С. Влияние ионов тяжёлых металлов на протеолитическую активность в печени моллюсков *Viviparus viviparus* L. // *Вестник Московского государственного областного университета. Серия: Естественные науки.* 2007. № 1. С. 3–6.

7. Филков П.В., Коничев А.С. Изменение активности РНКаз моллюска живородка речная (*Viviparus viviparus*) при отравлении тяжёлыми металлами // *Вестник Московского государственного областного университета. Серия: Естественные науки.* 2007. № 1. С. 12–17.

8. Дроганова Т.С., Коничев А.С., Петренко Д.Б., Поликарпова Л.В., Цветков И.Л. Влияние фторида натрия и фторуксусной кислоты на активность кислой ДНКазы, кислой фосфатазы и спектр растворимых белков гепатопанкреаса живородки речной // *Вестник Московского государственного*

ного областного университета. Серия: Естественные науки. 2017. № 4. С. 36–45.

9. Петренко Д.Б., Гладнева О.А., Ворончихина К.А., Васильев Н.В. Содержание фторид-ионов в поверхностных водах урбанизированных территорий Московского региона // Теоретическая и прикладная экология. 2017. № 3. С. 65–72.

10. Дроганова Т.С., Поликарпова Л.В., Коничев А.С. Усовершенствованный метод фракционирования белков моллюсков при электрофорезе в денатурирующих условиях // Проблемы региональной экологии. 2018. № 2. С. 65–67.

11. Lowry O.H., Rosenbrought N.J., Farr A.L., Randall R.J. Protein measurement with the Folin Phenol Reagent // J. Biol. Chem. 1951. V. 193. No. 2. P. 265–275.

12. Heinonen J.K., Lahti R.A. A new and convenient colorimetric determination to the assay of inorganic pyrophosphatase // Anal. Biochem. 1981. V. 113. No. 2. P. 313–317.

13. Цветков И.Л., Поликарпова Л.В., Коничев А.С. Новый метод количественного определения активности дезоксирибонуклеазы с использованием флуоресцентно-меченых олигонуклеотидов в качестве субстрата // Вестник Московского государственного областного университета. Серия: Естественные науки. 2012. № 3. С. 46–51.

14. Etxeberria M., Sastre I., Cajaraville M.P., Marigomez I. Digestive lysosome enlargement induced by experimental exposure to metals (Cu, Cd, and Zn) in mussels collected from a zinc-polluted site // Arch. Environ. Contam. Toxicol. 1994. V. 27. P. 338–345.

15. Au D.W. The application of histo-cytopathological biomarkers in marine pollution monitoring: a review // Mar. Pollut. Bull. 2004. V. 48. No. 9–10. P. 817–834.

16. Geret F., Cosson R.P. Induction of specific isoforms of metallothionein in mussel tissues after exposure to cadmium or mercury // Arch. Environ. Contam. Toxicol. 2002. V. 42. No. 1. P. 36–42.

17. Dallinger R., Chabicovsky M., Berger B. Isoform-specific quantification of metallothionein in the terrestrial gastropod *Helix pomata*. I. Molecular, biochemical, and methodical background // Environ. Toxicol. Chem. 2004. V. 23. No. 4. P. 890–901.

References

1. Moore J.W., Ramamoorthy S. Heavy metals in natural waters. Moskva: Mir, 1987. 288 p. (in Russian).

2. Gorinstein S., Jung S.T., Moncheva S., Arancibia-Avila P., Park Y.S., Kang S.G., Goshev I., Trakhtenberg S., Namiesnik J. Partial characterization of proteins from mussel *Mytilus galloprovincialis* as a biomarker of contamination // Arcg. Environ. Contam. Toxicol. 2005. V. 49. No. 4. P. 504–510.

3. Burlando B., Bonomo M., Capri F., Mancinelli G., Pons G., Viarengo A. Different effects of Hg^{2+} and Cu^{2+} on mussel (*Mytilus galloprovincialis*) plasma membrane Ca^{2+} -ATPase: Hg^{2+} induction of protein expression // Comp. Biochem. Physiol. C Toxicol. Pharmacol. 2004. V. 139. No. 4. P. 201–207.

4. Harmful chemicals (Inorganic compounds of Groups I–IV) / Ed. V.A. Filov. Leningrad: Khimiya, 1988. 592 p. (in Russian).

5. Tsvetkov I.L., Konichev A.S. Biochemical and molecular genetic aspects of adaptation of hydrobionts: monograph. Moskva: Izd-vo MGOU, 2013. 122 p. (in Russian).

6. Konin D.N., Konichev A.S. Effect of heavy metal ions on proteolytic activity in the liver of mollusks *Viviparus viviparus* L. // Vestnik Moskovskogo gosudarstvennogo oblastnogo universiteta. Seriya: Estestvennye nauki. 2007. No. 1. P. 3–6 (in Russian).

7. Filkov P.V., Konichev A.S. The change in the activity of the *Viviparus viviparus* mollusk RNase from poisoning with heavy metals // Vestnik Moskovskogo gosudarstvennogo oblastnogo universiteta. Seriya: Estestvennye nauki. 2007. No. 1. P. 12–17 (in Russian).

8. Droganova T.S., Konichev A.S., Petrenko D.B., Polikarpova L.V., Tsvetkov I.L. Influence of sodium fluoride and fluoroacetic acid on the activity of acidic DNase, acid phosphatase and the spectrum of soluble proteins of *Viviparus viviparus* L. // Vestnik Moskovskogo gosudarstvennogo oblastnogo universiteta. Seriya: Estestvennye nauki. 2017. No. 4. P. 36–45 (in Russian).

9. Petrenko D.B., Gladneva O.A., Voronchikhina K.A., Vasiliev N.V. Content of fluoride ions in surface waters in urbanized territories of the Moscow region // Theoretical and Applied Ecology. 2017. No 3. P. 65–72 (in Russian). doi: 10.25750/1995-4301-2017-3-065-072

10. Droganova T.S., Polikarpova L.V., Konichev A.S. The improved method of fractionating fresh-water mollusks based on the electrophoretic separation under denaturing conditions // Regional environmental issues. 2018. No. 2. P. 65–67 (in Russian). doi: 10.24441/1728-323X-2018-12065

11. Lowry O.H., Rosenbrought N.J., Farr A.L., Randall R.J. Protein measurement with the Folin Phenol Reagent // J. Biol. Chem. 1951. V. 193. No. 2. P. 265–275.

12. Heinonen J.K., Lahti R.A. A new and convenient colorimetric determination to the assay of inorganic pyrophosphatase // Anal. Biochem. 1981. V. 113. No. 2. P. 313–317.

13. Tsvetkov I.L., Polikarpova L.V., Konichev A.S. A new method for quantitative determination of deoxyribonuclease activity using fluorophore labeled oligonucleotides as a substrate // Vestnik Moskovskogo gosudarstvennogo oblastnogo universiteta. Seriya: Estestvennye nauki. 2012. No. 3. P. 46–51 (in Russian).

14. Etxeberria M., Sastre I., Cajaraville M.P., Marigomez I. Digestive lysosome enlargement induced by experimental exposure to metals (Cu, Cd, and Zn) in mussels collected from a zinc-polluted site // Arch. Environ. Contam. Toxicol. 1994. V. 27. P. 338–345.

15. Au D.W. The application of histo-cytopathological biomarkers in marine pollution monitoring: a review // Mar. Pollut. Bull. 2004. V. 48. No. 9–10. P. 817–834.

16. Geret F., Cosson R.P. Induction of specific isoforms of metallothionein in mussel tissues after exposure to cadmium or mercury // Arch. Environ. Contam. Toxicol. 2002. V. 42. No. 1. P. 36–42.

17. Dallinger R., Chabicovsky M., Berger B. Isoform-specific quantification of metallothionein in the terrestrial gastropod *Helix pomata*. I. Molecular, biochemical, and methodical background // Environ. Toxicol. Chem. 2004. V. 23. No. 4. P. 890–901.

Гистопатологии печени у рыб Саратовского водохранилища

© 2019. А. К. Минеев, д. б. н., с. н. с., О. В. Минеева, к. б. н., м. н. с.,
Институт экологии Волжского бассейна РАН,
445003, Россия, г. Тольятти, ул. Комзина, д. 10,
e-mail: mineev7676@mail.ru, ksukala@mail.ru

Приведены результаты многолетних ихтиопатологических исследований массовых видов рыб из акватории Кольцово-Мордовинского участка Саратовского водохранилища. С применением стандартных гистологических методик изучены патологии печени у плотвы, леща, окуня, бычков (кругляка, головача, цуцика) и головешки-ротана. Обнаружено 8 типов гистопатологических изменений органа: гиперемия, инфильтрация клеток крови, кистозные новообразования, пигментированные опухоли, фиброз, вакуольная и жировая дистрофии, некроз гепатоцитов. Выявленные патологии имели разную степень тяжести для рыб (2–4 балла по пятибалльной шкале). Преобладали повреждения, имеющие необратимый характер и угрожающие жизни рыб, особенно при воздействии стресс-факторов и в период зимовки. Разнообразие обнаруженных гистопатологических изменений печени является следствием воздействия на гидробионтов широкого диапазона поллютантов органической и неорганической природы, а также паразитарной инвазии.

Ключевые слова: Саратовское водохранилище, рыбы, гистопатологии печени.

Histopathology of fishes' liver in the Saratov reservoir

© 2019. A. K. Mineev ^{ORCID: 0000-0002-3464-0554}, O. V. Mineeva ^{ORCID: 0000-0002-5050-8545},
Institute of Ecology of the Volga River Basin RAS,
10, Komzina St., Togliatti, Russia, 445003,
e-mail: mineev7676@mail.ru, ksukala@mail.ru

In order to determine the level of anthropogenic load on the reservoir and form the ideas about the health of populations of aquatic organisms the ichthyopathological studies of mass fish species (*Rutilus rutilus* L., *Abramis brama* L., *Perca fluviatilis* L., *Neogobius melanostomus* Pallas, *N. iljini* Vasiljeva et Vasiljev, *Proterorhinus marmoratus* Pallas, *Percottus glenii* Dybowski) of the Saratov reservoir were carried out. Fish catching was carried out in the water area of the Koltsovo-Mordovin section of the reservoir in the period 2003–2013. As a bioindicator, the liver performing a variety of metabolic functions was chosen, which was studied by standard histological techniques. 8 types of histopathological organ changes were revealed. They were divided into circulatory (hyperemia), inflammatory (infiltration of blood cells), proliferative (cystic tumors, pigmented tumors, fibrosis) and degenerative (vacuole and fat dystrophy, necrosis of hepatocytes). The most common type of disorders was hyperemia (the incidence of the disease varies from 31.4% to 88.2%). Discovered histopathologies have different severity for fish (2–4 points on a five-point rating system state). Damage, which is usually irreversible and life-threatening to fish, especially when exposed to stress factors and during the winter, prevailed. The main factor determining the pathological changes of the liver is the intoxication of fish with pollutants of organic and inorganic nature. Parasitological study of fish revealed in the liver of animal larvae of nematodes *Eustrongylides excisus* Jägerskiöld, *Raphidascaris acus* Bloch, *Contracaecum microcephalum* Rudolphi, which have a pronounced mechanical and toxic effect. Nematode invasion causes the most serious damage to this organ (infiltration of blood cells, necrosis of hepatocytes).

Keywords: Saratov reservoir, fish, histopathology of liver.

Многофакторное антропогенное воздействие (гидростроительство, химическое и тепловое загрязнение, промысел, браконьерство и др.) неизбежно влечёт за собой деградацию водных и биологических ресурсов. Рыбы, высшее трофическое звено пресноводных экосистем, в течение своего продолжительно-

го жизненного цикла аккумулируют значительное количество поллютантов различной природы, что делает их удобным объектом биоиндикации. Поражения органов и тканей рыб могут наблюдаться при отсутствии визуальных симптомов интоксикации, в таких случаях патоморфологические изменения

являются единственным показателем вредного воздействия токсикантов [1].

Важнейшим гистофизиологическим маркером состояния организма и его реакции на экологический фон является печень, выполняющая множество метаболических функций, в том числе детоксикационную. Отечественными и зарубежными исследователями описаны разнообразные гистопатологические изменения в печени рыб, имеющие разную степень значимости для функционального состояния органа [1–7].

Цель настоящей работы состояла в оценке гистопатологического состояния печени массовых видов рыб Саратовского водохранилища, воды которого подвержены значительному антропогенному воздействию.

Материал и методика

Ихтиологический материал собирали в акватории Кольцово-Мордовинского участка Саратовского водохранилища (53°10' с. ш., 49°26' в. д.) в период с 2003 по 2013 гг. Всего исследовано 390 половозрелых особей семи видов рыб, в том числе 86 экз. плотвы *Rutilus rutilus* (L.), 41 экз. леща *Abramis brama* (L.), 36 экз. окуня *Perca fluviatilis* (L.), 42 экз. бычка-кругляка *Neogobius melanostomus*

(Pallas), 39 экз. бычка-головача *N. iljini* (Vasiljeva et Vasiljev), 34 экз. бычка-цуцика *Proterorhinus marmoratus* (Pallas) и 112 экз. головешки-ротана *Percottus glenii* (Dybowski).

При изготовлении гистологических препаратов (парафиновые срезы, 8 микрон) использовали стандартные методики [8]. Ихтиотоксикологическое состояние рыб оценивали по пятибалльной шкале [6].

Параллельно проводили паразитологическое исследование животных. Сбор, фиксацию и камеральную обработку паразитов осуществляли по общепринятой методике [9]. Видовую диагностику червей проводили по соответствующему определителю [10].

Для статистического анализа использовали программный пакет STATISTICA Statsoft, Inc. (v. 6) и MS Excel (2007).

Результаты и обсуждение

В результате многолетних исследований у рыб Саратовского водохранилища выявлено 8 типов нарушений печени (табл.).

Гистологический анализ показал, что у значительной части особей печень в различной степени гиперемирована (табл.), что свидетельствует об её интенсивном функционировании. Этот вид повреждений относят

Таблица / Table

Гистопатологии печени у рыб Саратовского водохранилища
Histopathology of liver of fish in the Saratov reservoir

Тип патологии Type of pathology	Встречаемость различных типов патологий, % Occurrence of different types of pathologies, %						
	<i>R. rutilus</i>	<i>A. brama</i>	<i>P. fluviatilis</i>	<i>N. melanostomus</i>	<i>N. iljini</i>	<i>P. marmoratus</i>	<i>P. glenii</i>
Гиперемия / Hyperemia	31,4±5,0	39,0±7,7	33,3±8,0	42,9±7,7	48,7±8,1	88,2±5,6	40,2±4,7
Вакуольная дистрофия Vacuole dystrophy	1,2±1,2	9,8±4,7	16,7±6,3	2,4±2,4	10,3±4,9	64,7±8,3	8,0±2,6
Жировая дистрофия Fat dystrophy	5,8±2,5	9,8±4,7	–	2,4±2,4	7,7±4,3	26,5±7,7	–
Кистозные новообразования / Cystic tumors	2,3±1,6	9,8±4,7	–	2,4±2,4	2,6±2,6	–	8,0±2,6
Пигментированные опухоли / Pigmented tumors	4,7±2,3	7,3±4,1	2,8±2,8	2,4±2,4	7,7±4,3	8,8±4,9	–
Фиброз / Fibrosis	–	4,9±3,4	13,9±5,9	9,5±4,6	10,3±4,9	5,9±4,1	6,3±2,3
Инфильтрация клеток крови / Infiltration of blood cells	11,6±3,5	31,7±7,4	11,1±5,3	11,9±5,1	17,9±6,2	17,6±6,6	8,0±2,6
Некроз гепатоцитов Necrosis of hepatocytes	11,6±3,5	26,8±7,0	5,6±3,9	19,0±6,1	20,5±6,6	52,9±8,7	14,3±3,3

Примечание: «–» – патология не отмечена.
Note: “–” – pathology not noted.

к нарушениям циркуляторного типа, которые обычно являются первыми признаками патологических процессов в органе, и по пятибалльной системе [6] оценивается как лёгкий, не угрожающий рыбам гибелью (2 балла).

В обычных условиях печени свойственна высокая реактивность и большой резерв функциональной способности. В условиях патологии функции печени нарушаются, а морфологическим признаком этих нарушений часто служат дистрофии [2, 11].

Наблюдаемая у всех видов рыб вакуольная дистрофия гепатоцитов характеризуется наличием в клетках печени вакуолей разного размера, наполненных цитоплазматической жидкостью. Встречаемость данной патологии, являющейся необратимой [11], у исследуемых гидробионтов варьирует в широких пределах (табл.).

Жировая дистрофия гепатоцитов, регистрируемая у 5 видов рыб (табл.), также относится к дегенеративным (с разрушением клеток) типам изменений. Мелкие капельки жира обнаруживаются и в нормальных клетках печени, однако в патологических условиях накопление липидов резко увеличивается. Причинами дегенеративного ожирения органа могут выступать как нарушения обменных процессов, развивающиеся вследствие ограничения кровотока, так и действие токсичных веществ [5, 11].

Кистозные новообразования в печени представляют собой аномальные полости в нормальной ткани органа, заполненные тканями разного происхождения. Подобные кисты образуются, по-видимому, в процессе дегенерации гепатоцитов, являясь результатом соединительно-тканых разрастаний их оболочки [1]. Данный тип гистопатологий является достаточно редким у рыб Саратовского водохранилища (табл.).

Пигментированные опухоли, также редко регистрируемые (табл.), представляют собой плотные новообразования с хорошо оформленными границами, состоящие из гранул, окрашенных в более тёмный, чем окружающие ткани, или чёрный цвет. У исследованных рыб количество подобных новообразований варьирует от одного до четырёх-пяти. Отложение пигментов в паренхиме органа является весьма характерным признаком токсического поражения печени [11].

У шести видов исследованных рыб наблюдается фиброз (табл.), возникающий при серьёзных повреждениях паренхимы печени и массовой гибели гепатоцитов. Актив-

ная пролиферация соединительно-тканной сети ведёт к диффузному нарушению архитектоники печени рыб (балочной структуры), а это, в свою очередь, предшествует развитию цирротических изменений [2].

К воспалительным (связанным с иммунными процессами) типам изменений относится инфильтрация клеток крови. Данная патология, как правило, предшествует некрозу печёночных тканей, так как некоторые виды лейкоцитов (нейтрофилы и эозинофилы) выполняют фагоцитарную функцию.

Некроз (дисплазия) гепатоцитов, регистрируемый нами у всех исследованных видов рыб (табл.), относится к наиболее серьёзным патологиям. Наличие некрозов всегда свидетельствует о тяжёлом, обычно прогрессирующем течении патологического процесса, причинами которого выступают загрязнения вод тяжёлыми металлами, либо паразитарные инвазии [12–14]. Микроскопическими признаками некроза являются изменения как клеточного ядра (кариопикноз, кариорексис, кариолизис), так и цитоплазмы [11].

Проведённое нами исследование показало, что в условиях Саратовского водохранилища у массовых видов рыб наблюдаются признаки хронического токсикоза. Согласно пятибалльной системе оценки ихтиотоксикологического состояния животных [6] степень выраженности токсикоза соответствовала 2–4 баллам.

Мы считаем, что основным фактором, обуславливающим патологические изменения печени рыб, является качество водной среды. Воды Саратовского водохранилища в исследуемом районе на протяжении ряда лет характеризуются как «загрязнённые» и «грязные» 3 А и 3 Б класса качества [15]. Акватория Кольцово-Мордовинского участка водохранилища находится под воздействием поллютантов различных групп. Это, прежде всего, техногенные загрязнения, поступающие в водоём из расположенных выше по течению крупных промышленных центров (гг. Тольятти, Самара, Чапаевск). Также значительный вклад в загрязнение акватории вносят диффузные стоки от мелких населённых пунктов и с сельскохозяйственных угодий.

На общую картину состояния печени, как индикаторного органа, мог повлиять и паразитарный фактор. Паразиты, проникая в ткани рыб, оказывают выраженное механическое и токсическое воздействие, проявляя при этом высокую патогенность. У инвазированных рыб наблюдаются нарушения липидного об-

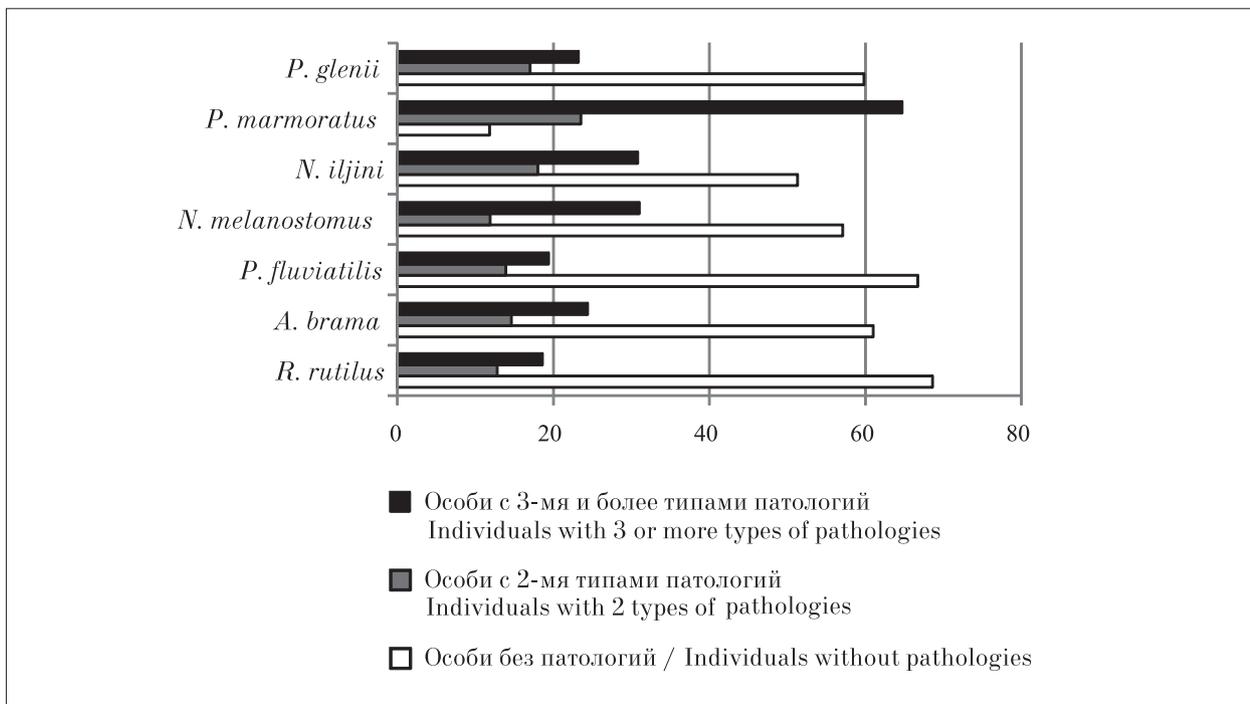


Рис. Встречаемость здоровых особей и особей с патологиями печени среди массовых видов рыб Саратовского водохранилища
Fig. Occurrence of healthy individuals and individuals with liver pathologies among the mass fish species of the Saratov reservoir

мена, усиление свободнорадикальных и перекисных процессов, дефицит образования структур антиоксидантной защиты, что предшествует развитию различных патологий печени [16, 17].

Особую патогенность имеют гельминты, локализующиеся собственно в печени (в свободном и/или инкапсулированном состоянии). У исследованных рыб обнаружено 3 вида нематод на личиночной стадии, уровень инвазии которыми колеблется от единичных случаев (*Eustrongylides excisus* Jägerskiöld) до 25–50% (*Raphidascaris acus* Bloch, *Contracaecum microcephalum* Rudolphi).

Нематодная инвазия печени вызывает наиболее серьёзные повреждения данного органа. При прохождении личинок (миграции червей) по печени нарушается целостность кровеносных сосудов, в результате чего форменные элементы крови выходят в ткань, развиваются обширные участки некроза. В тканях печени, содержащих инкапсулированных паразитов, хорошо заметна гиперплазия гепатоцитов, кариопикноз и кариолизис.

В современных условиях Саратовского водохранилища разнообразные нарушения печени рыб, вызванные стресс-факторами биотической и абиотической природы, встреча-

ются довольно часто (табл.), однако основу популяций исследованных видов рыб (за исключением бычка-цуцика) составляют особи, здоровые по данному признаку. Доля животных без каких-либо патологий печени у исследованных видов рыб различна и колеблется от 11,8% у бычка-цуцика до 68,6% у плотвы (рис.).

Печень таких рыб сохраняет нормальную архитектуру (балочное строение), гепатоциты без признаков патологических изменений, умеренно или слабо базофильны, липидных капель немного.

Следует отметить, что среди исследованных особей достаточно велика доля гидробионтов с тремя и более различными типами патологий печени (рис.), что, несомненно, указывает на высокий уровень токсической и паразитарной нагрузки на популяции массовых видов рыб в условиях Саратовского водохранилища.

Заключение

Многолетнее комплексное исследование рыб Саратовского водохранилища, включающее в себя патологоанатомический, гистологический и паразитологический анализ, показало, что ихтиофауна водоёма испытывает

хроническую токсическую нагрузку. Зарегистрированы 8 типов гистопатологических изменений печени разной степени тяжести. Согласно пятибалльной системе оценки ихтиотоксикологического состояния рыб степень выраженности токсикоза соответствует 2–4 баллам. Выявленные нарушения неизбежно ведут к дисфункции органа, к снижению его детоксикационной способности.

Патологические нарушения печени рыб весьма распространены; кроме того, они схожи у разных видов гидробионтов. В популяциях исследованных видов рыб часто встречаются особи, в печени которых одновременно обнаружены патологии не менее трёх различных типов.

Основными факторами, определяющими морфофункциональное состояние рыб, являются антропогенное загрязнение водоёмов и паразитарные инвазии.

В сложившихся экологических условиях, несомненно, важны мониторинг состояния водной среды, оценка качественного и количественного состава загрязнений водоёмов и водотоков, диагностика состояния функционально значимых систем организма, изучение механизмов естественной биотрансформации токсикантов в тканях. Однако действительно необходимым и продуктивным будет поиск путей реабилитации и повышения адаптационного потенциала рыб и других гидробионтов, что обеспечит их выживание в условиях мощного техногенного пресса. Требуется разработка и реализация таких технологий, которые не только снижают содержание токсикантов в окружающей среде, но и существенно повышают устойчивость биоты к воздействию стрессирующих факторов [1].

Исследования выполнены в рамках государственного задания ФГБУН Института экологии Волжского бассейна РАН, тема (проект) № АААА-А17-117112040039-7 «Экологические закономерности структурно-функциональной организации, ресурсного потенциала и устойчивого функционирования экосистем Волжского бассейна» (направление 51 «Экология организмов и сообществ»).

Литература

1. Селюков А.Г. Морфофункциональный статус рыб Обь-Иртышского бассейна в современных условиях. Тюмень: Изд-во Тюменского гос. ун-та, 2007. 184 с.
2. Fish pathology. London; Philadelphia; Sydney; Tokyo; Toronto: Stirling Univ., 1989. 383 p.

3. Pedlar R.M., Ptashinski M.D., Evans R., Klaverkamp J.F. Toxicological effects of dietary arsenic exposure in lake whitefish (*Coregonus clupeaformis*) // *Aquat. toxicol.* 2002. V. 57. No. 3. P. 167–189.

4. Thophon S., Kruatrachue M., Upathan E.S., Pochthititook P., Sahaphong S., Jarikhuan S. Histopathological alterations of white seabass (*Lates calcarifer*) in acute and subchronic cadmium exposure // *Environ pollut.* 2003. No. 121. P. 307–320.

5. Agamy E. Histopathological changes in the livers of Rabbit Fish (*Siganus canaliculatus*) following exposure to crude oil and dispersed oil // *Toxicol. pathology.* 2012. No. 40. P. 1128–1140.

6. Грушко М.П., Фёдорова Н.Н., Насиханова М.Н. Состояние жизненно важных органов судака Волго-Каспийского бассейна // *Вестник АГТУ. Сер. Рыбное хозяйство.* 2013. № 3. С. 108–112.

7. Шуман Л.А., Некрасов И.С., Селюков А.Г. Морфофункциональные корреляции окуня *Perca fluviatilis* в загрязнённых озёрах Среднего Приобья // *Вестник Тюменского государственного университета.* 2013. № 12. С. 128–139.

8. 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.

9. Быховская-Павловская И.Е. Паразиты рыб. Руководство по изучению. Л.: Наука, 1985. 121 с.

10. Определитель паразитов пресноводных рыб фауны СССР. Т. 2. Л.: Наука, 1985. 425 с.

11. Крючков В.Н., Дубовская А.В., Фомин И.В. Особенности патологической морфологии печени рыб в современных условиях // *Вестник АГТУ.* 2006. № 3 (32). С. 94–100.

12. Tramp B.F., Jones R.T., Sahaphong S. Cellular effects of mercury on fish kidney tubules // *The pathology of fishes* / Eds. W.E. Ribelin, M. Migan. Wis. Univ., Wisconsin Press, 1975. P. 585–612.

13. Kent M.L., Myers M.S., Hinton D.E., Eaton W.D., Elston R.A. Suspected toxicopathic hepatic necrosis and megalocytosis in pen-reared Atlantic salmon *Salmo salar* in Puget Sound, Washington, USA // *Dis. Aquat. Org.* 1988. V. 4. P. 91–100.

14. Hibiya E.T. An atlas of fish histology: normal and pathological features. N.Y.: Kodansha Ltd, 1996. 147 p.

15. Государственный доклад о состоянии окружающей среды и природных ресурсов Самарской области за 2013 год. Вып. 24. Самара: Изд-во «ДСМ», 2014. 283 с.

16. Bell G.L., Margolis L. The fish health program and the occurrence of fish diseases in the pacific region of Canada // *Fish Pathol.* 1976. V. 10. P. 115–122.

17. Izvekova G.I., Zhokhov A.E. Effect of metacercarial infection on some physiological traits of roach underyearlings // *Inland water biology.* 2016. V. 9. No. 1. P. 91–96.

References

1. Selyukov A.G. Morphological and functional status of fishes of the Ob-Irtysh watershed in the modern world. Tyumen: Izd-vo Tyumenskogo gosudarstvennogo universiteta, 2007. 184 p. (in Russian).
2. Fish pathology. London; Philadelphia; Sydney; Tokyo; Toronto: Stirling Univ., 1989. 383 p.
3. Pedlar R.M., Ptashinski M.D., Evans R., Klaverkamp J.F. Toxicological effects of dietary arsenic exposure in lake whitefish (*Coregonus clupeaformis*) // *Aquat. toxicol.* 2002. V. 57. No. 3. P. 167–189.
4. Thophon S., Kruatrachue M., Upathan E.S., Pochithiyook P., Sahaphong S., Jarikhuan S. Histopathological alterations of white seabass (*Lates calcarifer*) in acute and subchronic cadmium exposure // *Environ pollut.* 2003. No. 121. P. 307–320.
5. Agamy E. Histopathological changes in the livers of Rabbit Fish (*Siganus canaliculatus*) following exposure to crude oil and dispersed oil // *Toxicol. pathology.* 2012. No. 40. P. 1128–1140.
6. Grushko M.P., Fedorova N.N., Nasikhanova M.N. State of vital organs of pike perch in the Volgo-Caspian basin // *Vestnik AGTU. Ser.: Rybnoye khozyaystvo.* 2013. No. 3. P. 108–112 (in Russian).
7. Schuman L.A., Nekrasov I.S., Selyukov A.G. Morphofunctional correlations of the perch *Perca fluviatilis* in polluted lakes of the Middle Ob region // *Vestnik Tyumenskogo gosudarstvennogo universiteta.* 2013. No. 12. P. 128–139 (in Russian).
8. 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).
9. Bykhovskaya-Pavlovskaya I.E. Parasites of fishes. Study Guide. Leningrad: Nauka, 1985. 121 p. (in Russian).
10. The guide on parasites in freshwater fish of the USSR fauna. Leningrad: Nauka, 1985. V. 2. 425 p. (in Russian).
11. Kruchkov V.N., Dubovskaya A.F., Fomin I.V. Peculiarities of pathologic morphology of fish liver in modern conditions // *Vestnik AGTU.* 2006. No. 3 (32). P. 94–100 (in Russian).
12. Tramp B.F., Jones R.T., Sahaphong S. Cellular effects of mercury on fish kidney tubules // *The pathology of fishes / Eds. W.E. Ribelin, M. Migan. Wis. Univ., Wisconsin Press, 1975. P. 585–612.*
13. Kent M.L., Myers M.S., Hinton D.E., Eaton W.D., Elston R.A. Suspected toxicopathic hepatic necrosis and megalocytosis in pen-reared Atlantic salmon *Salmo salar* Puget Sound, Washington, USA // *Dis. Aquat. Org.* 1988. V. 4. P. 91–100.
14. Hibiya E.T. An atlas of fish histology: normal and pathological features. N.Y.: Kodansha Ltd, 1996. 147 p.
15. State report on the state of the environment and natural resources of the Samara region for 2013. V. 24. Samara: Izd-vo DSM, 2014. 283 p. (in Russian).
16. Bell G.L., Margolis L. The fish health program and the occurrence of fish diseases in the pacific region of Canada // *Fish Pathol.* 1976. V. 10. P. 115–122.
17. Izvekova G.I., Zhokhov A.E. Effect of metacercarial infection on some physiological traits of roach underyearlings // *Inland water biology.* 2016. V. 9. No. 1. P. 91–96.

Экотоксикологические характеристики нефтезагрязнённых грунтов (шламов) после их реагентной обработки

© 2019. О. А. Куликова¹, аспирант,
В. А. Терехова^{2,3}, д. б. н., профессор, зав. лабораторией,
Е. А. Мазлова¹, д. т. н., профессор, Ю. А. Нишкевич², инженер,
К. А. Кыдралиева^{4,5}, д. х. н., профессор,

¹Российский государственный университет нефти и газа (НИУ) им. И. М. Губкина,
119991, Россия, г. Москва, Ленинский проспект, д. 65,

²Московский государственный университет им. М. В. Ломоносова,
119992, Россия, г. Москва, Ленинские горы, д. 1,

³Российский экономический университет им. Г. В. Плеханова,
115093, Россия, г. Москва, Стремянный пер., д. 36,

⁴Московский авиационный институт,
125993, Россия, г. Москва, Волоколамское шоссе, д. 4,

⁵Институт прикладной биохимии и машиностроения,
127299, Россия, г. Москва, ул. К. Цеткин, д. 4,

e-mail: letap.msu@gmail.com

Представлены результаты экспериментальной обработки нефтесодержащих отходов с территории Варьёганского месторождения (Ханты-Мансийский автономный округ – Югра, Тюменская область) поверхностно-активным реагентом с целью снижения их токсичности. Эффект обработки реагентом БОК-6 образцов грунтовых нефтешламов, содержащих 7,92–18,67 масс. % нефтепродуктов (при массовом соотношении нефтешлам : реагент = 1 : 10 в течение 30 мин при 60 °С и перемешивании 120 об./мин), проанализированный в батарее биотест-систем, показал снижение токсических свойств нефтесодержащих отходов. Об этом свидетельствуют увеличение недействующих концентраций водных экстрактов из очищенных нефтешламов в биотестах на дафниях *Daphnia magna* и инфузориях *Paramecium caudatum*, а также уменьшение их отрицательного фитотоксического эффекта. При аппликатном способе фитотестирования (при контакте семян с твёрдой массой образцов) наблюдалась большая чувствительность семян *Raphanus sativus*, *Avena sativa*, *Sinapi salba* к токсическому действию исследуемых образцов, чем при элюатном (взаимодействие с водным экстрактом). Проведённые исследования показывают, что применение физико-химических методов очистки растворами поверхностно-активных веществ способствует обезвреживанию нефтесодержащих отходов, снижая содержание нефтепродуктов.

Ключевые слова: ремедиация, почвогрунты, нефтешламы, нефтяное загрязнение, поверхностно-активные вещества, экотоксичность, биотестирование.

Ecotoxicological characteristics of oil-contaminated soils (sludges) after their reagent treatment

© 2019. О. А. Kulikova¹ ORCID: 0000-0002-2300-3496, V. A. Terekhova^{2,3} ORCID: 0000-0001-9121-639X,
E. A. Mazlova¹ ORCID: 0000-0001-8976-1292, Yu. A. Nishkevich² ORCID: 0000-0001-8307-7342,
K. A. Kydralieva^{4,5} ORCID: 0000-0002-4596-4140

¹Gubkin Russian State University of Oil and Gas (National Research University),
65, Leninsky Prospekt, Moscow, Russia, 119991,

²M. V. Lomonosov Moscow State University,
1, Leninskie Gory, Moscow, Russia, 119992,

³Plekhanov Russian University of Economics,
36, Stremyanny Pereulok, Moscow, Russia, 117997,

⁴Moscow Aviation Institute (National Research University),

4, Volokolamskoe Shosse, Moscow, Russia, 125993,

⁵Joint-Stock Company Institute of the Applied Biochemistry and Machine-Building,
4, Klary Tsetkin St., Moscow, Russia, 127299,
e-mail: letap.msu@gmail.com

The article presents the results of an experimental processing of the ground oil sludges from the territory of the Varyogan oil field (Khanty-Mansi Autonomous Area – Yugra, Tyumen Region), using surface-active reagent for decreasing toxicity. The efficiency of the chemical reagent treatment of the oil sludge samples (OS), 7.92–18.67 wt% oil contented, was characterized. The treatment was carried out at a mass ratio of oil sludge:reagent = 1:10 for 30 minutes at 60 °C and 120 rpm. The effect of the oil sludges treatment by the BOK-6 reagent, analyzed in a battery of biotest systems, showed a decrease in the toxicity level of the samples. This tendency is evidenced by a decrease in the No Observed Effect Concentration (NOEC) of aqueous extracts from the treated samples in biotests with crustacea *Daphnia magna* and infusoria *Paramecium caudatum*, as well as a decrease of negative phytoeffect caused by treated samples versus untreated. In the process of phytoassay with the applicative method (upon contact of seeds with a solid mass of samples), the observed sensitivity of *Raphanus sativus*, *Avena sativa*, *Sinapis alba* seeds was higher than with the eluate (interaction with water extract) testing method. In general, the conducted studies showed that the physicochemical treatment methods with surfactants solutions contribute to the neutralization of oil sludges, reducing the content of petroleum products.

Keywords: remediation, soil, oil sludge, oil pollution, surfactants, ecotoxicity, biotesting.

Приоритетными в современной природоохранной сфере считаются задачи обеспечения устойчивого функционирования и восстановления экосистем, нарушенных в процессе осуществления хозяйственной деятельности человека, связанной с добычей, транспортировкой, хранением, переработкой нефти и использованием нефтепродуктов [1–3]. Восстановление природных объектов при загрязнении высокотоксичными нефтепродуктами, которые характеризуются низкой скоростью фото- и биodeградации, остаются серьёзной экологической проблемой, угрожающей распространением в окружающей среде опасных компонентов и их переносом в подземные воды и пищевую цепь. Нефтяное загрязнение почв приводит не только к морфологическим и структурным изменениям, снижению плодородия, но и к изменению тонких механизмов функционирования почв, окислительно-восстановительных процессов, снижению активности почвенных ферментов и биоразнообразия микробных комплексов, что приводит к нарушению экологического баланса в наземных биомах, трансформации трофических звеньев естественных биогеоценозов или даже их гибели [4–8].

Существует немало технологий очистки нефтезагрязнённых почв и почвогрунтов, применяющихся как *in situ*, так и *ex situ* [9–14]. В последние несколько десятилетий ремедиация природных сред на основе современных биотехнологических методов, в частности, биостимуляция и биоаугментация, вызывают большой интерес. Однако эти методы эффективны лишь для небольшой категории нефтепродуктов, представленных лёгкими

нефтяными углеводородами, и адаптированы к конкретным условиям. До настоящего времени на практике наиболее распространёнными оказываются варианты термической и физико-химической обработки [15–18].

Изъятие нефтезагрязнённых почв из природной среды и перемещение в накопители отходов переводит их в категорию нефтешламов. Ужесточение требований к внедрению экологически безопасных технологий и стремление к минимизации загрязнений приводят к необходимости повышения качества очистки загрязнённых нефтепродуктами почв, почвогрунтов, нефтешламов, других природных и техногенных субстратов [19]. Особое внимание при этом заслуживает использование физико-химических, в частности, реагентных, способов очистки. Промывка нефтезагрязнённых субстратов горячими растворами реагентов – поверхностно-активными веществами (ПАВ), согласно ГОСТ Р 57447-2017 и Industrial Emission Directive 2010/75/EU (Final Draft 2017), относится к наилучшим доступным технологиям. Однако химические реагенты, применяющиеся для промывки отходов нефтяной индустрии, могут приводить к риску вторичного загрязнения окружающей среды.

Цель данного исследования заключалась в оценке эффективности нейтрализации токсичности нефтешламов (НШ) методом реагентной обработки раствором ПАВ.

Объекты и методы исследования

Образцы нефтешламов (НШ-1 и НШ-2), отобранные из двух шламохранилищ пред-

приятия ОАО «Варьёганнефть» (Ханты-Мансийский автономный округ – Югра, Тюменская область), характеризовались разной обводнённостью и степенью выветренности.

Для определения содержания нефти и нефтепродуктов предварительно просушенные на воздухе образцы нефтешламов обрабатывали согласно EPA method 3545 Pressurized Fluid Extraction (PFE) с использованием экстрактора Thermo Scientific Dionex ASE 150, в качестве растворителя использовали спектрально чистый *n*-гексан. Анализ проводили с использованием анализатора «Флюорат-02» в соответствии с ПНД Ф 16.1:2.21-98 (М 03-03-2012).

С учётом большого количества мешающих проведению анализа факторов, обусловленных неопределённостью химического состава НШ, дополнительно определяли содержание общего органического вещества в пробах НШ по ГОСТ 23740-2016.

В качестве химического реагента для обработки НШ был использован реагент БОК-6 на основе кальцинированной соды и неионогенного ПАВ, относящегося к 4 классу опасности. Согласно опубликованным данным, для различных типов нефти и модельных грунтов эффективность применения БОК-6 составляет 60–85% [20]. Обработку раствором ПАВ навесок НШ проводили при массовом соотношении НШ : раствор = 1 : 10 при 60 °С и 120 об./мин в течение 30 мин.

Дисперсную систему отстаивали 24 ч, затем свободную нефть и отработанный раствор ПАВ удаляли, осадок промывали (ополаскивали) чистой водой для удаления остаточного содержания моющих средств.

При исследовании токсичности исходных и отмытых нефтешламов из образцов получали вытяжки (элюаты) однократной водной экстракцией исходных и обработанных НШ при комнатной температуре и соотношении НШ : экстрагент = 1 : 10. Для биотестирования использовали серийные разведения элюатов с целью определения действующих (эффективных) концентраций.

Токсикологические исследования выполняли с применением стандартизованных тест-культур разной таксономической принадлежности и соответствующих методик: ракообразные *Daphnia magna* Straus – ФР.1.39.2007.03222, инфузории *Paramecium caudatum* Ehrenberg – ФР.1.39.2006.02506, бактерии – генномодифицированный биолюминесцентный штамм *Escherichia coli* в составе препарата «Эколюм» – ПНД Ф Т 14.1:2:3:4.11-04

(ПНД Ф Т 16.1:2.3:3.8-04) и высшие растения – ФР.1.31.2012.11560.

Фитотестирование по развитию проростков семян высших растений в планшетах проводили двумя способами – элюатным и аппликатным [21, 22]. При элюатном способе семена помещали в нижнюю камеру прозрачного пластикового планшета на подложку из фильтровальной бумаги, пропитанную испытуемым раствором – элюатом из образцов или дистиллированной водой (контроль). При аппликатном способе семена помещали на образцы твёрдой массы нефтешламов при 24 °С.

По истечении 96-часовой экспозиции измеряли длину корней и побегов, после чего согласно методике рассчитывали фитоеффект, т. е. устанавливали степень ингибирования или стимуляции роста растений по соотношению тест-параметров в опытных (после ПАВ) и контрольных вариантах.

Нетоксичными считали пробы, в которых подавление роста корней не превышало 20% относительно контроля.

Токсикометрические параметры рассчитывали с помощью пробит-анализа как долю водного экстракта образца нефтешлама в исследуемой пробе, вызывающую гибель 50% тест-организмов (EC_{50} , %) или при которой гибель тест-организмов в выборке не превышает 10% ($NOEC_{10}$, %).

Статистическая обработка результатов проводилась с использованием MSOffice общепринятыми методами с определением средних арифметических значений и их стандартных отклонений.

Результаты и обсуждение

Результаты очистки нефтешламов растворами ПАВ оценивали по остаточному содержанию нефтепродуктов и изменению токсичности отходов. Степень снижения содержания органического вещества, включая нефтепродукты, показана в таблице 1.

Как видно из приведённых данных, эффективность реагентной обработки двух образцов нефтешламов заметно различалась, для нефтешлама НШ-2 она составила 77%, для НШ-1 – 92%

Биологическая оценка эффективности обработки нефтешламов ПАВ марки БОК-6 проведена методами биотестирования. Токсичность исходных образцов нефтешламов до реагентной обработки ПАВ превышала допустимые значения в биотестах на дафниях, инфузориях и высших растениях. Обработка

Таблица 1 / Table 1

Эффективность реагентной обработки нефтешламов
The effectiveness of the reagent treatment of oil sludges

Образец НШ Oil sludge sample	Содержание нефтепродуктов, масс. % Oil content, wt %	Содержание общего органического вещества, масс. % Total organic compound, wt %	Остаточное содержание нефти и нефтепродуктов, масс. % Residual oil content, wt %	Остаточное содержание общего органического вещества, масс. % Residual total organic compound content, wt %
НШ-1 / OS-1	18,67	42,57	4,37	24,04
НШ-2 / OS-2	7,92	26,07	0,60	1,10

Таблица 2 / Table 2

Влияние обработки раствором ПАВ на изменение токсикометрических параметров водных экстрактов нефтешламов / The toxicometric parametric variation in aqueous extracts as affected by surfactant solution treatment of oil sludge

Образец нефтешлама Oil sludge sample		Токсикометрические параметры			
		<i>Paramecium caudatum</i>		<i>Daphnia magna</i>	
		<i>EC</i> ₅₀ , %	<i>NOEC</i> ₁₀ , %	<i>EC</i> ₅₀ , %	<i>NOEC</i> ₁₀ , %
НШ-1 / OS-1	до ПАВ / before treatment	2,25	0,08	3,47	0,33
	после ПАВ / after treatment	3,31	0,11	3,67	0,39
НШ-2 / OS-2	до ПАВ / before treatment	8,78	0,12	2,21	0,11
	после ПАВ / after treatment	51,29	0,87	10,64	0,65

Примечание: *EC*₅₀, % – «эффективная концентрация» (доля водного экстракта из образца нефтешлама в пробе), вызывающая гибель 50% тест-организмов в выборке; *NOEC*₁₀, % – «максимальная недействующая концентрация» (доля водного экстракта из образца нефтешлама в пробе), при которой гибель тест-организмов в выборке не превышает 10%.

Note: *EC*₅₀, % – “effective concentration” (the proportion of the aqueous extract from the oil sludge sample in the sample), causing the death of 50% of the test organisms in the sample; *NOEC*₁₀, % – “no observed effect concentration” (the proportion of the aqueous extract from the oil sludge sample in the sample) at which the death of test organisms in the sample does not exceed 10%.

реагентом БОК-6 приводила к уменьшению негативного воздействия на живые системы, что выразилось в увеличении значений *EC*₅₀ в опытах с инфузориями и дафниями (табл. 2).

Фитоэффекты образцов нефтешламов НШ по отношению к проросткам семян трёх видов высших растений представлены в таблице 3.

При действии исходных НШ практически не наблюдали прорастание семян ни при элюатном, ни при аппликатном фитотестировании. После реагентной обработки было заметно положительное влияние ПАВ, что выразилось в снижении значений отрицательного фитоэффекта, особенно заметного в воздействии на проростки горчицы и редиса (табл. 3). Из приведённых данных видно, что аппликатный способ почти в три раза чувствительнее, чем элюатный. Развитие побегов у однодольных (овса) угнетается нефтепродуктами в большей степени, чем рост корней. При этом интересно, что у двудольных длина

корней как тест-функция чувствительнее к воздействию исследуемых проб, чем длина побегов.

В бактериальном биотесте степень воздействия проб на биолюминесцентный препарат «Эколюм» оценивается по величине индекса токсичности (Т), который рассчитывается автоматически прибором «Биотокс» в соответствии со стандартной методикой по соотношению интенсивности люминесцентного свечения в контрольной (*I*_к) и в опытной (*I*_{оп}) пробах. Степень токсичности поделена на диапазоны с пороговыми значениями Т – 20 и 50.

Результаты биотестирования водных экстрактов образцов двух нефтешламов, обработанных ПАВ, в исходном состоянии и при разведениях в 10, 100 и 1000 раз представлены в таблице 4.

Полученные нами данные во всех вариантах бактериального теста не превышают критическое значение Т > 20, что согласно

Таблица 3 / Table 3

Фитоэффекты нефтешламов при элюатном и аппликатном способах обработки семян высших растений / Phyto-effects of oil sludge by eluate and applicate treatment of higher plants seeds

Образец нефтешлама и способ обработки Oil sludge sample		Фитоэффект нефтешламов, рассчитанный по изменению длины корней и побегов у проростков, % Phyto-effects of oil sludge, %						Фитоэффект (среднее значение для трёх видов тест-растений), % Phyto-effect, %	
		<i>Sinapis alba</i>		<i>Avena sativa</i>		<i>Raphanus sativus</i>			
		побеги shoots	корни roots	побеги shoots	корни roots	побеги shoots	корни roots	среднее average	ст. откл. std. dev.
НШ-1 / OS-1	элюатный eluate	14,1	-24,9	-62,1	-49,4	-20,2	-20,7	-27,20	26,51
	аппликатный applicate	-63,0	-89,8	-98,5	-91,8	-61,1	-76,6	-80,13	15,72
НШ-2 / OS-2	элюатный/ eluate	-36,8	-24,7	-43,0	-29,4	12,45	-10,45	-21,98	20,21
	аппликатный applicate	-42,8	-82,0	-96,5	-86,9	-33,4	-51,2	-65,47	26,24
Фитоэффект (среднее значение для всех способов обработки), % Average phyto-effect, %		-32,13	-55,35	-75,03	-64,38	-25,56	-39,74	–	–
Фитоэффект, ст. откл. Phyto-effect, std. dev.		32,79	35,42	27,11	30,04	30,54	30,06	–	–

Примечание: прочерк обозначает, что показатель не может быть рассчитан.
Note: A dash indicates that a metric cannot be calculated.

Таблица 4 / Table 4

Значения индекса токсичности (Т) при биотестировании образцов нефтешламов, обработанных ПАВ, в бактериальной тест-системе «Эколюм» / Toxicity index values for biotesting samples of treated oil sludge in the “Ecolum” bacterial test system

Кратность разведения экстрактов / Dilution factor for the extracts	Значения индекса токсичности, Т The values of the toxicity index, T	
	НШ-1 / OS-1	НШ-2 / OS-2
1 (исходный) / (initial)	-2,897 (1178/1212) ¹	-2,617 (815,2/836,6)
10	-1,413 (1156/1172)	0,674 (856,8/851,0)
100	-2,366 (1113/1139)	-8,156 (765,7/828,1)
1000	-16,44 (900,2/1048)	-36,53 (383,2/523,2)

Примечание:¹ I_{κ}/I_{on} – средние значения интенсивности свечения в контроле I_{κ} и в опыте I_{on} .
Note:¹ I_{κ}/I_{on} – average values of the luminescence intensity in the control I_{κ} and in the experiment I_{on} .

использованной методики трактуется как «допустимая степень токсичности» (табл. 4). Эти результаты являются определённым свидетельством того, что для деградации углеводов в этих образцах можно применять бактериальные препараты. При этом очевидно, что при оценке токсичности образцов, содержащих нефтепродукты, ориентироваться только на бактериальный биOLUMИнесцентный биотест некорректно. Необходимо исследовать степень их опасности в широком спектре тест-систем, которые должны включать аппликат-

ные варианты биотестирования на растениях или беспозвоночных животных [23–24].

Заключение

Проведённые исследования показывают, что применение физико-химических методов очистки растворами ПАВ в определённой степени способствует обезвреживанию нефтесодержащих отходов, снижая содержание нефтепродуктов и вызывая повышение максимально недействующих концентраций

проб отходов. Хотя химические реагенты не являются идеальным решением при очистке всех видов нефтесодержащих отходов, они во многих случаях способствуют извлечению дополнительного количества нефтепродуктов и превращению отходов в субстраты, более пригодные для их размещения в природной среде.

Литература

1. Oil in the environment: legacies and lessons of the Exxon Valdez oil spill / Ed. J.A. Wiens. United Kingdom, Cambridge: Press Cambridge University, 2013. 482 p.
2. Геннадиев А.Н. Нефть и окружающая среда // Вестник Московского университета. Серия 5: География. 2016. № 6. С. 30–39.
3. Лупачёв А.В., Деева Н.Ф., Аладин Д.Ю., Севостьянов С.М., Дёмин Д.В. Анализ загрязнения нефтепродуктами и хлорорганическими соединениями почв и грунтов в окрестностях Российских антарктических станций // Теоретическая и прикладная экология. 2017. № 2. С. 49–53.
4. Aislabie J.M., Balks M.R., Foght J.M., Waterhouse E.J. Hydrocarbon spills on antarctic soils: Effects and Management // Environmental Science & Technology. 2004. V. 38. No. 5. P. 1265–1274.
5. Капелькина Л.П. Трансформация тундровых экосистем на нефтепромыслах Севера России // Теоретическая и прикладная экология. 2014. № 1. С. 49–52.
6. Морозова Л.М., Эктова С.Н. Влияние разработки нефтегазовых месторождений на растительный покров тундровой зоны // Теоретическая и прикладная экология. 2014. № 1. С. 53–56.
7. Киреева Н.А., Водопьянов В.В., Мифтахова А.М. Биологическая активность нефтезагрязнённых почв. Уфа: Гилем, 2001. 376 с.
8. Dubrovskaya E.V., Pozdnyakova N.N., Muratova A.Y., Turkovskaya O.V. Changes in phytotoxicity of polycyclic aromatic hydrocarbons in the course of microbial degradation // Russ. J. PlantPhysiol. 2016. No. 44. P. 172–179.
9. Экологические основы оптимизированной технологии восстановления нефтезагрязнённых природных объектов на Севере / Под ред. Г.М. Тулянкина, И.Б. Арчеговой. Сыктывкар: НЦ УрО РАН, 200. 140 с.
10. Camenzuli D., Freidman V.L. On-site and in situ remediation technologies applicable to petroleum hydrocarbon contaminated sites in the Antarctic and Arctic // Polar Research. 2015. No. 34. P. 24492–24492.
11. Завьялова Н.В., Филимонов И.В., Ковтун В.А., Голипад А.Н., Петров С.В., Стяжкин К.К., Ефременко Е.Н., Холстов В.И., Янковская А.А. Основные технологические операции и стадии биоремедиации почв и очистки вод *in situ* // Теоретическая и прикладная экология. 2014. № 4. С. 33–40.
12. Пукальчик М.А., Терехова В.А., Якименко О.С., Акулова М.И. Сравнение ремедиационных эффектов биочара и лигногумата на почвы при полиметаллическом загрязнении // Теоретическая и прикладная экология. 2016. № 2. С. 79–85.
13. Kumari S., Regar R.K., Manickam N. Improved polycyclic aromatic hydrocarbon degradation in a crude oil by individual and a consortium of bacteria // Bioresource Technology. 2018. V. 254. P. 174–179.
14. Zafra G., Taylor T.D., Absalón A.E., Cortés-Espinosa D.V. Comparative metagenomic analysis of PAH degradation in soil by a mixed microbial consortium // Journal of Hazardous Materials. 2016. V. 318. P. 702–710.
15. Moldes A.B., Paradelo R., Rubinos D., Devesa-Rey R., Cruz J.M., Barral M.T. Ex situ treatment of hydrocarbon-contaminated soil using biosurfactants from *Lactobacillus pentosus* // J. Agric. Food Chem. 2011. No. 59. P. 9443–9447.
16. Lee L.S., Zhai X., Lee J. INDOT guidance document for in-situ soil flushing. Purdue University, 2007. 48 p.
17. Barnes D.L., Laderach Sh.R., Shower Ch. Treatment of petroleum-contaminated soil in Cold, Wet, Remote Regions. Washington: USDA's TARGET Center, 2002. 59 p.
18. Zhu K., Hart W., Yang J. Remediation of petroleum-contaminated loess soil by surfactant-enhanced flushing technique // Journal of Environmental Science and Health, Part A: Toxic Hazardous Substances and Environmental Engineering. 2005. No. 40. P. 1877–1893.
19. Алексеев А.А., Ивановская А.И., Алексеев А.И. Проблемы обращения с отходами, загрязнёнными нефтепродуктами, и пути их решения // Нефтепромысловое дело. 2007. № 4. С. 128–129.
20. Куликова О.А., Мазлова Е.А., Брадик Д.И., Кудрова Е.П. Использование реагентов на основе поверхностно-активных веществ для очистки почв от нефтяного загрязнения // Химия и технология топлив и масел. 2018. № 6. С. 47–52.
21. Pukalchik M.A., Terekhova V.A., Karpuchin M.M., Vavilova V.M. Comparison of eluate and direct soil bioassay methods of soil assessment in the case of contamination with heavy metals // Eurasian Soil Science. 2019. V. 52. No. 4. P. 507–514.
22. Nikolaeva O., Terekhova V. Improvement of laboratory phytotest for the ecological evaluation of soils // Eurasian Soil Science. 2017. V. 50. No. 9. P. 1105–1114.
23. Шарапова И.Э., Лаптева Е.М., Маслова С.П., Табаленкова Г.И., Гарабаджиу А.В. Использование интегрального коэффициента биологической активности почвы и индекса фитотоксичности для оценки фиторемедиации нефтезагрязнённых почв // Теоретическая и прикладная экология. 2015. № 2. С. 67–73.
24. Каниськин М.А., Изосимов А.А., Терехова В.А., Якименко О.С., Пукальчик М.А. Влияние гуминовых препаратов на биоактивность почвогрунта с фосфогипсом // Теоретическая и прикладная экология. 2011. № 1. С. 87–95.

References

1. Oil in the environment: legacies and lessons of the Exxon Valdez oil spill / Ed. J.A. Wiens. United Kingdom, Cambridge: Press Cambridge University, 2013. 482 p.
2. Gennadiyev A.N. Oil and environment // Vestnik Moskovskogo universiteta. Seriya 5: Geografiya. 2016. No. 6. P. 30–39 (in Russian).
3. Lupachev A.V., Deeva N.F., Aladin D.Yu., Sevostyanov S.M., Demin D.V. Analysis of pollution with oil products and organochlorines of soils in the vicinity of Russian Antarctic stations // Theoretical and Applied Ecology. 2017. No. 2. P. 49–53 (in Russian). doi: 10.25750/1995-4301-2017-2-049-053
4. Aislabie J.M., Balks M.R., Foght J.M., Waterhouse E.J. Hydrocarbon spills on antarctic soils: effects and management // Environmental Science & Technology. 2004. V. 38. No. 5. P. 1265–1274. doi: 10.1021/es0305149
5. Kapelkina L.P. Transformation of tundra ecosystems in oil development industrials of the North of Russia // Theoretical and Applied Ecology. 2014. No. 1. P. 49–52 (in Russian). doi: 10.25750/1995-4301-2014-1-049-052
6. Morozova L.M., Ektova S.N. The impact of oil and gas development on vegetation of the tundra zone // Theoretical and Applied Ecology. 2014. No. 1. P. 53–56 (in Russian). doi: 10.25750/1995-4301-2014-1-053-056
7. Kireeva N.A., Vodopyanov V.V., Miftakhova A.M. Biological activity of oil-contaminated soils. Ufa: Gilem, 2001. 376 p. (in Russian).
8. Dubrovskaya E.V., Pozdnyakova N.N., Muratova A.Y., Turkovskaya O.V. Changes in phytotoxicity of polycyclic aromatic hydrocarbons in the course of microbial degradation // Russ. J. Plant Physiol. 2016. No. 44. P. 172–179.
9. Ecological basis of the optimized technology for the restoration of oil-contaminated natural objects in the North / Eds. G.M. Tulyankin, I.B. Arhegova. Syktyvkar: NTs UrO RAN, 2007. 140 p. (in Russian).
10. Camenzuli D., Freidman B.L. On-site and in situ remediation technologies applicable to petroleum hydrocarbon contaminated sites in the Antarctic and Arctic // Polar Research. 2015. No. 34. P. 24492–24492. doi: 10.3402/polar.v34.24492
11. Zavyalova N.V., Filimonov I.V., Kovtun V.A., Golipad A.N., Petrov S.V., Styazhkin K.K., Efremenko E.N., Kholstov V.I., Yankovskaya A.A. The main technological operations and stages of bioremediation of soils and water purification in situ // Theoretical and Applied Ecology. 2014. No. 4. P. 34–41 (in Russian). doi: 10.25750/1995-4301-2014-3-033-040
12. Pukalchik M.A., Terekhova V.A., Yakimenko O.S., Akulova M.I. Evaluation of biochar and lignogumate remediation effect in heavy metal-contaminated soil // Theoretical and Applied Ecology. 2016. No. 2. C. 79–85 (in Russian). doi: 10.25750/1995-4301-2016-2-079-085
13. Kumari S., Regar R.K., Manickam N. Improved polycyclic aromatic hydrocarbon degradation in a crude oil by individual and a consortium of bacteria // Bioresource Technology. 2018. V. 254. P. 174–179. doi: 10.1016/j.biortech.2018.01.075
14. Zafra G., Taylor T.D., Absalón A.E., Cortés-Espinosa D.V. Comparative metagenomic analysis of PAH degradation in soil by a mixed microbial consortium // Journal of Hazardous Materials. 2016. V. 318. P. 702–710. doi: 10.1016/j.jhazmat.2016.07.060
15. Moldes A.B., Paradelo R., Rubinos D., Devesa-Rey R., Cruz J.M., Barral M.T. Ex situ treatment of hydrocarbon-contaminated soil using biosurfactants from *Lactobacillus pentosus* // J. Agric. Food Chem. 2011. No. 59. P. 9443–9447. doi: 10.1021/jf201807r
16. Lee L.S., Zhai X., Lee J. INDOT guidance document for in-situ soil flushing. Purdue University, 2007. 48 p.
17. Barnes D.L., Laderach Sh.R., Shower Ch. Treatment of petroleum-contaminated soil in Cold, Wet, Remote Regions. Washington: USDA's TARGET Center, 2002. 59 p.
18. Zhu K., Hart W., Yang J. Remediation of petroleum-contaminated loess soil by surfactant-enhanced flushing technique // Journal of Environmental Science and Health, Part A: Toxic Hazardous Substances and Environmental Engineering. 2005. No. 40. P. 1877–1893. doi: 10.1080/10934520500183899
19. Alekseev A.A., Ivanovskaya A.I., Alekseev A.I. Problems of the managing waste contaminated with petroleum products, and ways to solve them // Neftepromyslovoe delo. 2007. No. 4. P. 128–129 (in Russian).
20. Kulikova O.A., Mazlova E.A., Bradik D.I., Kudrova E.P. Chemical reagents based on surfactants for oil-contaminated soils treatment // Chemistry and Technology of Fuels and Oils. 2018. No. 6. P. 47–52. doi: 10.1007/s10553-019-00982-1
21. Pukalchik M.A., Terekhova V.A., Karpuchin M.M., Vavilova V.M. Comparison of eluate and direct soil bioassay methods of soil assessment in the case of contamination with heavy metals // Eurasian Soil Science. 2019. V. 52, No. 4. P. 507–514.
22. Nikolaeva O., Terekhova V. Improvement of laboratory phytotest for the ecological evaluation of soils // Eurasian Soil Science. 2017. V. 50. No. 9. P. 1105–1114. doi: 10.1134/S1064229317090058
23. Sharapova I.E., Lapteva E.M., Maslova S.P., Tabalenkova G.I., Garabadzhiu A.V. Using the integral coefficient of soil biological activity and the phytotoxicity index for accessing phytoremediation of oil-polluted soils // Theoretical and Applied Ecology. 2015. No. 2. P. 67–73 (in Russian). doi: 10.25750/1995-4301-2015-2-042-067-073
24. Kaniskina M.A., Izosimov A.A., Terekhova V.A., Yakimenko O.S., Pukalchik M.A. The influence of humic products on bioactivity of soils with phosphogypsum // Theoretical and Applied Ecology. 2011. No. 1. P. 86–93 (in Russian). doi: 10.25750/1995-4301-2011-1-086-093

Агроэкологическое действие осадка сточных вод и его смесей с цеолитом на агроценозы масличных культур

© 2019. Д. В. Виноградов¹, д. б. н., профессор, зав. кафедрой,
В. М. Василева², д. с.-х. н., профессор,
М. П. Макарова³, к. б. н., Б. И. Кочуров⁴, д. г. н., профессор,
Е. И. Лупова¹, к. б. н., доцент,

¹Рязанский агротехнологический университет имени П. А. Костычева,
390044, Россия, г. Рязань, ул. Костычева, д. 1,

²Институт кормовых культур,
5800, Болгария, г. Плевен, ул. Генерала Владимира Вазова, д. 89,

³Министерство сельского хозяйства и продовольствия Рязанской области,
390006, Россия, г. Рязань, ул. Есенина, д. 9,

⁴Институт географии Российской академии наук,
119017, Россия, г. Москва, ул. Старомонетный переулок, д. 29,

e-mail: vdvrzn@mail.ru, viliana.vasileva@gmail.com,
assistent_84@mail.ru, camertonmagazin@mail.ru, katya.lilu@mail.ru

В статье представлены результаты исследований, посвящённых разработке эффективных и экологически безопасных приёмов применения осадков сточных вод в сельскохозяйственном производстве. В полевом опыте изучались органоминеральные удобрения, состоящие из осадка сточных вод и цеолита – природного сорбента, способного поглощать загрязняющие вещества за счёт высокой ёмкости катионного обмена. Применяемые удобрения способствовали увеличению линейных параметров и активизации фотосинтетических процессов растений ярового рапса и подсолнечника, и, как следствие, повышению продуктивности агроценозов масличных культур. Установлено увеличение высоты растений ярового рапса опытных вариантов на 75,0–89,4%, площади листовой поверхности в фазу цветения – до 2,2 раз, количества стручков на одном растении – на 14,2–38,3%, количества семян на одном растении – на 41,2–65,8%. Наиболее высокие результаты были получены при внесении осадка сточных вод и цеолита в дозах 9 и 6,75 т/га соответственно, т. е. в соотношении 1 : 0,75. Урожайность маслосемян ярового рапса превысила контроль на 93%. Установили, что применение органоминеральных удобрений на основе осадка сточных вод и цеолита является эффективным способом утилизации отходов за счёт вовлечения биогенных элементов в биологические круговороты веществ.

Ключевые слова: осадки сточных вод, цеолиты, тяжёлые металлы, яровой рапс, подсолнечник.

Agroecological effect of sewage sludge and its mixtures with zeolite on the agrocenoses of oilseeds

© 2019. D. V. Vinogradov¹ ORCID: 0000-0003-2017-1491²

V. M. Vasileva² ORCID: 0000-0001-5602-7892³, M. P. Makarova³ ORCID: 0000-0001-9007-5273⁴

B. I. Kochurov⁴ ORCID: 0000-0002-8351-3658⁵, E. I. Lupova¹ ORCID: 0000-0001-5465-6046⁶

¹Ryazan State Agrotechnological University Named after P.A. Kostychev,
1, Kostychev St., Ryazan, Russia, 390044,

²Institute of Forage Crops,
89, General Vladimir Vazov St., Pleven, Bulgaria, 5800,

³Ministry of Agriculture and Ryazan Food of the Region,
9, Esenina St., Ryazan, Russia, 390006,

⁴Institute of Geography of the Russian Academy of Sciences,
29, Staromonetny Pereulok, Moscow, Russia, 119017,

e-mail: vdvrzn@mail.ru, viliana.vasileva@gmail.com,
assistent_84@mail.ru, camertonmagazin@mail.ru, katya.lilu@mail.ru

The article presents the results of studies devoted to the development of effective and environmentally safe methods of using sewage sludge in agricultural production. In the field experiment organomineral fertilizers were studied consisting of sewage sludge and zeolite, a natural sorbent capable of absorbing pollutants due to the high capacity of cation exchange. Applied fertilizers contributed to the increase of linear parameters and activation of photosynthetic processes of plants of spring rape and sunflower, and to increase the productivity of agrocenoses of oilseeds. An increase in the height of plants of spring rape in experimental variants was by 75.0–89.4%, the area of the leaf surface in the flowering phase was multiplied up to 2.2 times, the number of pods on one plant increased by 14.2–38.3%, the number of seeds per one plant – by 41.2–65.8%. The highest results were obtained when sewage sludge and zeolite were dosed at amounts of 9 t/ha and 6.75 t/ha respectively, that is, in a ratio of 1 : 0.75. The yield of oilseeds of spring rapeseed exceeded the control by 93%. It was concluded that the use of organo-mineral fertilizers based on sewage sludge and zeolite is an effective way of recycling waste by involving biogenic elements in the biological cycles of substances.

Keywords: sewage sludge, zeolites, heavy metals, spring rape, sunflower.

Проблема утилизации осадков сточных вод (ОСВ) с каждым годом приобретает всё большую актуальность, так как их количество неуклонно возрастает [1–3]. Благодаря высокому содержанию биогенных элементов, одним из наиболее рациональных путей решения проблемы утилизации ОСВ является применение их в сельскохозяйственном производстве в качестве удобрений. Это особенно актуально в настоящее время, когда на поля вносится в среднем менее 2 т/га органических удобрений и повсеместно отмечается отрицательный баланс по органическому веществу почвы [4–9].

Разработка агрономически эффективных и экологически безопасных технологий утилизации ОСВ является актуальной задачей, имеющей важное практическое значение как для охраны окружающей среды, так и для сельского хозяйства, в том числе и в технологиях производства масличных культур [3, 6, 10, 11]. В последние годы в качестве природных мелиорантов всё чаще применяют цеолиты – алюмосиликатные минералы, имеющие кристаллическое строение и отличающиеся высокой ёмкостью катионного обмена [12–14].

Цель исследований заключалась в разработке агроэкологических приёмов, позволяющих использовать ОСВ в качестве нетрадиционных удобрений для повышения продуктивности агроценозов масличных культур.

В задачи исследований входило:

- определение оптимальных соотношений ОСВ и цеолита в изучаемых удобрениях;
- измерение морфометрических параметров растений, показателей фотосинтетической деятельности агроценозов масличных культур, величины урожая и его структуры;
- оценка уровня загрязнения маслосемян изучаемых масличных культур тяжёлыми металлами.

Методика исследований

Полевой опыт закладывали на агротехнологической опытной станции РГАТУ, расположенной в Рязанском районе Рязанской области [15]. Почва опытного участка – тёмно-серая лесная среднесуглинистая, содержание гумуса (по Тюрину) – 3,6–3,8%, подвижного фосфора (по Кирсанову) – 169 мг/кг почвы, калия – 132 мг/кг, обменная кислотность (вытяжка KCl) – 5,7–5,8 ед. рН. Площадь опытной делянки составляла 50 м², учётная площадь – 40 м², повторность четырёхкратная.

В опыте использовали осадки, образующиеся на очистных сооружениях г. Рязани. Перед внесением ОСВ хранили на иловых картах в течение 6 месяцев после их извлечения из аэротенков (табл. 1).

Проведённые санитарно-бактериологические и санитарно-паразитологические анализы не выявили ограничений к применению ОСВ в качестве удобрений, так как в них отсутствовали патогенные бактерии, яйца гельминтов, цисты лямблий, личинки и куколки мух.

В опыте применяли цеолит Хотынецкого месторождения Орловской области. Агрохимические свойства цеолита: рН_{KCl} 8,3 ед. рН, содержание фосфора – 1,43%, калия – 1,82%, плотность – 2,2 г/см³, объёмная масса – 1,28 г/см³, общая пористость – 61%, катионообменная ёмкость – 34,2 мг-экв./100 г почвы, содержание свинца – 23 мг/кг, кадмия – 1,2 мг/кг, мышьяка – 1,3 мг/кг [1, 17].

Схема опыта: 1. Контроль (без удобрений); 2. ОСВ (доза внесения 9 т/га); 3. Удобрение-1 (соотношение осадок и цеолит 1:0,25); 4. Удобрение-2 (соотношение осадок и цеолит 1:0,5); 5. Удобрение-3 (соотношение осадок и цеолит 1:0,75); 6. Удобрение-4 (соотношение осадок и цеолит 1:1).

Климат Рязанской области умеренно тёплый и неустойчиво влажный. Сумма по-

Таблица 1 / Table 1

Характеристика осадков сточных вод / Characteristics of sewage sludge

Показатель Indicator	Содержание в ОСВ Sewage sludge	ГОСТ Р 17.4.3.07-2001 [16] GOST R 17.4.3.07-2001 [16]
Влажность, % / Humidity, %	68,0	≤ 82,0
pH _{KCl}	8,2	5,50–8,50
C _{орг.} % на сухое вещество / C _{орг.} % dry matter	74,0	≥ 20,0
Азот общий, % на сухое вещество Nitrogen total, % dry matter	1,74	≥ 0,6
Фосфор общий, % на сухое вещество Phosphorus total, % dry matter	1,60	≥ 1,5
Валовое содержание токсичных элементов, мг/кг сухого вещества Gross content of toxic elements, mg/kg dry matter		
Pb	51,4	500
Cd	14,5	30
Ni	173,4	400
Zn	183,0	3500
Cu	47,3	1500
Hg	0,005	15
Cr общий / Cr total	514,3	1000
As	3,0	20

ложительных температур воздуха за период активной вегетации составляет 2150–2400 °С. Годовая сумма осадков в среднем составляет 450–550 мм с колебаниями от 300 мм до 700 мм. Климатические условия региона благоприятны для выращивания масличных культур.

Объекты исследований: яровой рапс (*Brassica napus*) сорта Ратник, подсолнечник (*Helianthus annuus*) сорта Посейдон 625. Агротехнические мероприятия были проведены в соответствии с рекомендациями [18].

В опыте проводили фенологические наблюдения и отборы растительных образцов по основным фазам роста и развития. Особое внимание уделяли линейным и фотосинтетическим параметрам растений, которые оказывают существенное влияние на продуктивность масличных культур.

Оценка уровня химического загрязнения маслосемян проводилась по следующим показателям:

– коэффициент концентрации, определяющийся как отношение содержания определяемого химического вещества в опытном варианте к его содержанию в контрольном варианте;

– суммарный показатель **Zc**, представляющий собой аддитивную сумму превышений коэффициентов концентрации (рассеяния) над единичным (фоновым) уровнем [19].

Математическую обработку данных проводили методом дисперсионного анализа по [20].

Результаты и обсуждение

Наблюдения за динамикой роста и развития растений ярового рапса показали, что наиболее интенсивное увеличение линейных параметров растений отмечалось в межфазный период розетка листьев – цветение.

В фазу образования розетки листьев удобренные растения на 16,4–32,9% превышали высоту растений в контроле. В фазу цветения преимущество растений опытных вариантов сохранилось, превышение контроля составило 75,0–89,4%. Следует отметить, что при применении органоминеральных удобрений (ОМУ) растения ярового рапса несущественно отличались от растений в варианте с чистым осадком.

Более интенсивное нарастание листовой поверхности растений ярового рапса свидетельствовало о благоприятном действии удобрений на основе ОСВ и цеолита на фотосинтетические показатели растений. Площадь листьев растений всех опытных вариантов значительно превышала данный показатель в контроле (рис. 1). Максимальные значения площади ассимиляционной поверхности были получены в варианте с соотношением осадка и цеолита 1 : 0,75: в фазу образования розетки листьев – 14,9 тыс. м²/га, в фазу начала цветения – 23,6 тыс. м²/га, в фазу созревания – 22,4 тыс. м²/га.

Повышение урожая семян ярового рапса происходило не только за счёт увеличения площади листовой поверхности, но и за счёт

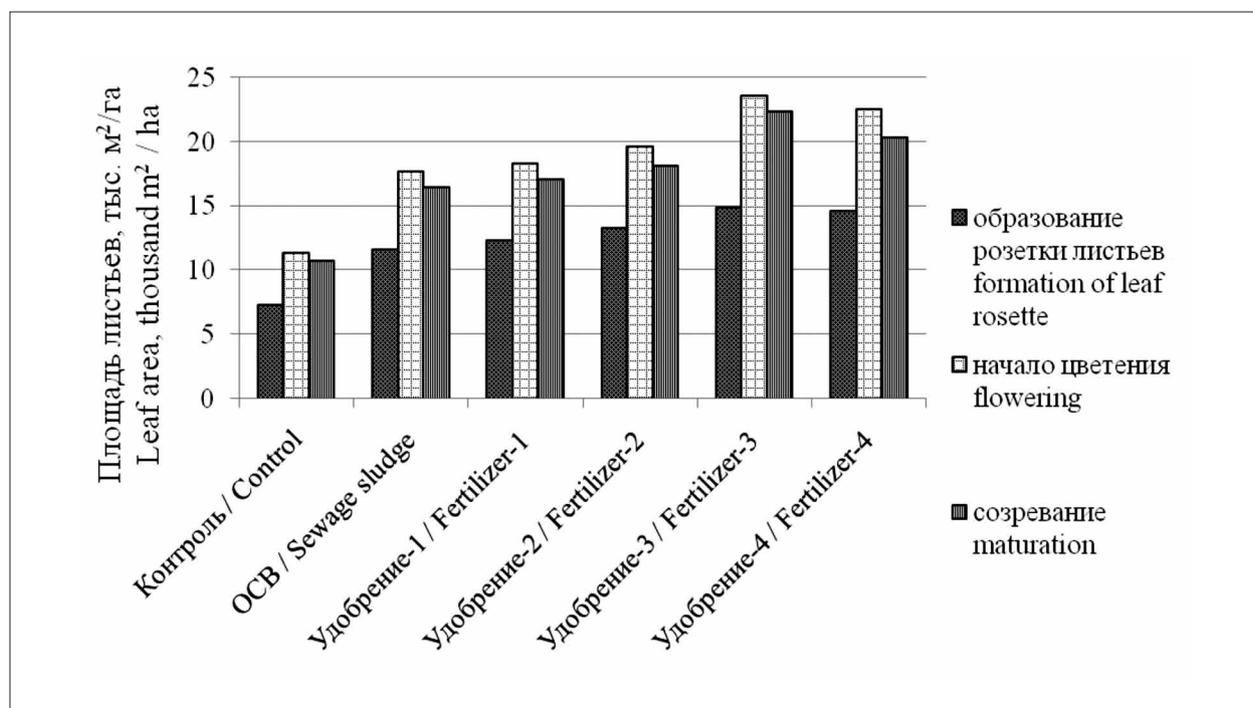


Рис. 1. Влияние органо-минеральных удобрений на площадь ассимиляционной поверхности растений ярового рапса

Fig. 1. Effect of organo-mineral fertilizers on the area of the assimilation surface of spring rape plants

Таблица 2 / Table 2

Влияние органо-минеральных удобрений на фотосинтетические показатели посевов ярового рапса
Effect of organo-mineral fertilizers on photosynthetic indicators of spring rape seed sowing

Вариант Variant	Фотосинтетический потенциал, млн м² сут/га Photosynthetic potential, million m² day/ha		Чистая продуктивность фотосинтеза, г/м² в сутки Net productivity of photosynthesis, g/m² per day)	
	розетка листьев – начало цветения net productivity of folio leaves – the beginning of flowering	вегетационный период vegetative period	розетка листьев rosette of leaves	начало цветения flowering
Контроль / Control	0,53±0,09	0,92±0,20	1,75±0,09	1,63±0,24
Осадок сточных вод Sewage sludge	0,91±0,25	1,55±0,49	2,15±0,34	1,89±0,35
Удобрение-1 / Fertilizer-1	0,95±0,26	1,61±0,49	2,23±0,34	1,98±0,36
Удобрение-2 / Fertilizer-2	1,02±0,26	1,74±0,52	2,37±0,38	2,10±0,36
Удобрение-3 / Fertilizer-3	1,25±0,35	2,19±0,73	2,61±0,23	2,35±0,42
Удобрение-4 / Fertilizer-4	1,20±0,33	2,02±0,61	2,55±0,21	2,27±0,39

большей продуктивности листьев. Чистая продуктивность фотосинтеза (ЧПФ) в фазе розетки листьев в вариантах с ОМУ увеличилась на 0,4–0,9 г/м² в сутки по сравнению с аналогичным показателем контрольного варианта. Существенных различий между значениями ЧПФ в вариантах с чистым осадком и ОМУ не наблюдалось.

Фотосинтетический потенциал (ФП) посевов ярового рапса по вариантам опыта из-

менялся пропорционально площади листьев и продолжительности их функционирования (табл. 2).

Аналогичная закономерность отмечалась у растений подсолнечника. Наблюдения показали, что изучаемые ОМУ оказали благоприятное влияние на повышение активности процесса фотосинтеза: увеличилась листовая поверхность, фотосинтетический потенциал, чистая продуктивность фотосинтеза. Макси-

Таблица 3 / Table 3

Влияние органо-минеральных удобрений на коэффициенты концентрации тяжёлых металлов в семенах ярового рапса и суммарный коэффициент (Zc)
Effect of organo-mineral fertilizers on the concentration of heavy metals in the seeds of spring rape and the total ratio coefficient (Zc)

Вариант Variant	Коэффициенты концентрации элементов Element concentration ratios						Коэффициент Zc Coefficient Zc
	Zn	Cu	Pb	Cd	Cr	Ni	
Осадок сточных вод 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

мальная площадь листьев отмечалась в варианте с внесением осадка и цеолита в соотношении 1 : 0,75 и составила 30,1–35,2 тыс. м²/га. Фотосинтетический потенциал растений в вариантах с изучаемыми удобрениями достиг 1,45–1,88 млн м² сут./га, чистая продуктивность фотосинтеза – 4,41–4,90 г/м² в сутки.

В эксперименте было установлено, что количество стручков на растениях опытных вариантов незначительно превышало контроль: при внесении чистого осадка – на 9,9%, при использовании ОМУ – на 14,2–38,3%. За годы исследований наибольшее количество продуктивных стручков (18,5–24,5 шт. на одном растении) было сформировано в варианте с соотношением осадка и цеолита 1 : 0,75. Возрастание дозы цеолита до 9 т/га обусловило снижение данного показателя на 3,6%.

В вариантах с удобрениями на одном растении было получено, в среднем за годы исследований, от 277 до 326 шт. семян, что превышало аналогичный показатель в контроле на 81–130 шт. (41,2–65,8%) и в варианте с чистым осадком – на 17–66 шт. (6,5–25,0%). Количество семян в одном стручке растений опытных вариантов составило, в среднем, 13,2–14,9 штук.

В среднем за годы исследований наибольшая урожайность семян ярового рапса отмечалась в варианте с соотношением осадка и цеолита 1 : 0,75 и составила 11,0 ц/га, что было выше контроля на 5,3 ц/га или 93,0%. При внесении осадка и цеолита в соотношениях 1:0,25; 1:0,5 и 1:1 выход семян увеличился по сравнению с контролем на 54,4; 63,2 и 87,7% соответственно.

Внесение ОМУ оказало положительное влияние на урожайность маслосемян подсолнечника. В среднем за годы исследований прибавка урожайности составила 6,2–8,7 ц/га по вариантам опыта. Максимальный урожай был

получен при внесении осадка и цеолита в соотношении 1 : 0,75 и составил 32,9 ц/га. Остальные опытные варианты также превышали контроль, но на меньшую величину.

Полученные данные показали, что применение природного мелиоранта – цеолита совместно с ОСВ способствовало меньшему накоплению загрязняющих веществ в растительной продукции (табл. 3). Добавление к осадку цеолита способствовало снижению содержания в семенах цинка и никеля – на 8,8%, меди – на 11,5%, хрома – до уровня контроля.

Заключение

Применяемые ОМУ на основе ОСВ и цеолита обеспечили активизацию ростовых процессов, более активное развитие надземной массы растений, что, в свою очередь, увеличило фотосинтетические показатели растений масличных культур, а также элементы структуры урожая. Всё это, в конечном итоге, отразилось на урожайности масличных культур. Наиболее высокие показатели были получены при внесении ОСВ и цеолита в дозах 9 т/га и 6,75 т/га соответственно, т.е. при соотношении осадка и цеолита 1 : 0,75. Урожайность маслосемян ярового рапса превысила контроль на 0,53 т/га, подсолнечника – на 0,87 т/га.

За счёт адсорбции цеолитом цинка, никеля, меди и хрома, в вариантах с ОМУ маслосемена ярового рапса содержали меньше поллютантов по сравнению с семенами, полученными при использовании в качестве удобрения чистого осадка.

Таким образом, внесение осадков сточных вод совместно с природным мелиорантом цеолитом позволило использовать ОСВ в сельскохозяйственном производстве в качестве органо-минеральных удобрений.

Литература

1. Макарова М.П., Виноградов Д.В. Влияние органо-минеральных удобрений на основе ОСВ и цеолита на продуктивность агроценоза ярового рапса // Вестник Рязанского государственного агротехнологического университета имени П.А. Костычева. 2013. № 3. С. 109–112.
2. Мерзлая Г.Е., Зябкина Г.А., Нестерович И.А., Фомкина Т.П. Агроэкологическая оценка использования осадка сточных вод // Агрехимия. 1995. № 5. С. 100–108.
3. 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.
4. Babaev M.P. Morphogenetic profiles of soils of Azerbaijan. Baku: Elm Publishing House, 2004. 204 p.
5. 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 (2). P. 145–148.
6. Vinogradov D., Polyakov A., Kuntsevich A. Influence of technology of growing on yield and oil chemical composition of linseed in non-chernozem zone of Russia // Journal of Agricultural Sciences. 2012. V. 57. No. 3. P. 135–142.
7. Макарова М.П., Виноградов Д.В. Влияние различных уровней минерального питания на фотосинтетические показатели и продуктивность гибридов подсолнечника в условиях Рязанской области // Вестник Рязанского государственного агротехнологического университета имени П.А. Костычева. 2014. № 4. С. 36–40.
8. Mustafayev M.G. Influence of soil-climatic conditions of the Mugano-Salyan massif on agricultural production // Tbilisi. News of agrarian science. 2008. V. 6. No. 3. P. 44–47.
9. Ilieva A., Vasileva V. Effect of liquid organic humate fertilizer Humustim on chemical composition of spring forage pea // Banat's Journal of Biotechnology. 2013. V. 7. P. 74–79.
10. 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. No. 11 (4). P. 139–148.
11. Vinogradov D.V., Lupova E.I., Byshov N.V., Kruchkov M.M., Fadkin G.N. Production of oil flax seed in non-black earth zone of Russia // International Journal of Advanced Biotechnology and Research (IJABR). 2019. V. 10. No. 2. P. 406–416.
12. Shchur A., Valkho V., Vinogradov D., Valkho O. Influence of biologically active preparations on Cs-137 transition to plants from soil in the territories contaminated as the result of Chernobyl accident / Impact of Cesium on Plants and the Environment // Springer International Publishing Switzerland. 2017. P. 51–70.
13. Hanes Y. Vplyv zeolitovych tufitov na fyzikalno-chemicke vlastnosti pody // Pol'nohospodarstvo. 1990. V. 36. No. 5. P. 393–407 (на словацком яз.).
14. Bogaci R., Danilic D. Spesifik behavior of zeolite tuffs in soil processes of cation exchanges // Bulletin of the Academy of Agric. and Forestry Science. 1989. No. 8. P. 227–235.
15. Методика проведения полевых агротехнических опытов с масличными культурами / 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. Титова В.И., Забегалов Н.В. Сравнительное изучение влияния цеолита и минеральных удобрений на продуктивность зерновых культур и агрохимическую характеристику светло-серой лесной легкосуглинистой почвы // Почвоведение и агрохимия. 2014. № 1 (52). С. 190–198.
18. Перспективная ресурсосберегающая технология производства подсолнечника: Метод. реком. М.: ФГНУ «Росинформагротех», 2008. 56 с.
19. Сагет Ю.Е., Ревич Б.А., Янин Е.П. Геохимия окружающей среды. М.: Недра, 1990. 335 с.
20. Доспехов Б.А. Методика полевого опыта (с основами статистической обработки результатов исследований). М.: Агропромиздат, 1985. 351 с.

References

1. Makarova M.P., Vinogradov D.V. Influence of organomineral fertilizers on the basis of WWS and zeolite on the productivity of spring rape agroecosis // Vestnik Ryazanskogo gosudarstvennogo agrotekhnologicheskogo universiteta imeni P.A. Kostycheva. 2013. No. 3. P. 109–112 (in Russian).
2. Merzlaya G.E., Zyabkina G.A., Nesterovich I.A., Fomkina T.P. Agroecological assessment of sewage sludgeuse // Agrokimiya. 1995. No. 5. P. 100–108 (in Russian).
3. Khabarova T.V., Vinogradov D.V., Kochurov B.I., Levin V.I., Byshov N.V. Agroecological efficiency of using sewage sludge and vermicomposts in the agroecosis of oats in sowing // Yug Rossii: ekologiya, razvitie. 2018. V. 13. No. 2. P. 132–143 (in Russian). doi: 10.18470/1992-1098-2018-2-132-143
4. Babaev M.P. Morphogenetic profiles of soils of Azerbaijan. Baku: Elm Publishing House, 2004. 204 p.
5. 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 (2). P. 145–148. doi: 10.7508/GJESM.2015.02.006
6. Vinogradov D., Polyakov A., Kuntsevich A. Influence of technology of growing on yield and oil chemical

composition of linseed in non-chernozem zone of Russia // *Journal of Agricultural Sciences*. 2012. V. 57. No. 3. P. 135–142. doi: 10.2298/JAS1203135V

7. Makarova M.P., Vinogradov D.V. Influence of different levels of mineral nutrition on photosynthetic indices and productivity of sunflower hybrids in the Ryazan region // *Vestnik Ryazanskogo gosudarstvennogo agrotekhnologicheskogo universiteta imeni P.A. Kostycheva*. 2014. No. 4. P. 36–40 (in Russian).

8. Mustafayev M.G. Influence of soil-climatic conditions of the Mugano-Salyan massif on agricultural production // *Tbilisi. News of agrarian science*. 2008. V. 6. No. 3. P. 44–47.

9. Ilieva A., Vasileva V. Effect of liquid organic humate fertilizer Humustim on chemical composition of spring forage pea // *Banat's Journal of Biotechnology*. 2013. V. 7. P. 74–79. doi: 10.7904/2068-4738-IV(7)-74

10. 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. No. 11 (4). P. 139–148 (in Russian). doi: 10.18470/1992-1098-2016-4-139-148

11. Vinogradov D.V., Lupova E.I., Byshov N.V., Kruchkov M.M., Fadkin G.N. Production of oil flax seed in non-black Earth zone of Russia // *International Journal of Advanced Biotechnology and Research (IJABR)*. 2019. V. 10. No. 2. P. 406–416.

12. Shchur A., Valkho V., Vinogradov D., Valkho O. Influence of biologically active preparations on Cs-137 transition to plants from soil in the territories contaminated as the result of Chernobyl accident // *Impact of Cesium*

on Plants and the Environment. Springer International Publishing Switzerland. 2017. P. 51–70. doi: 10.1007/978-3-319-41525-3_4

13. Hanes Y. The effect of zeolite tufts on the physicochemical properties is regressive // *Polnohospodarstvo*. 1990. V. 36. No. 5. P. 393–407 (in Slovak).

14. Bogaci R., Danilic D. Spesifik behavior of zeolite tufts in soil processes of cation exchanges // *Bulletin of the Academy of Agric. and Forestry Science*. 1989. No. 18. P. 227–235.

15. Methods of conducting field agrotechnical experiments with oilseeds / Ed. V.M. Lukomets. Krasnodar: FGBNU FNTs VNITMK, 2010. 327 p. (in Russian).

16. GOST R 17.4.3.07-2001. Nature Conservation. The soil. Requirements for the properties of sewage sludge when used as fertilizer. Moskva: Standardinform, 2008. 5 p. (in Russian).

17. Titova V.I., Zabegalov N.V. Comparative study of the effect of zeolite and mineral fertilizers on the productivity of grain crops and agrochemical characteristics of light gray forest light loamy soil // *Pochvovedenie i agrokhimiya*. 2014. No. 1 (52). P. 190–198 (in Russian).

18. Perspective resource-saving technology of sunflower production: Method. the river. Moskva: Rosinformagrotekh, 2008. 56 p. (in Russian).

19. Sayet Y.E., Revich B.A., Yanin E.P. Geochemistry of the environment. Moskva: Nedra, 1990. 335 p. (in Russian).

20. Dospekhov B.A. Methodology of field experience (with the basics of statistical processing of research results). Moskva: Agropromizdat, 1985. 351 p. (in Russian).

Состав и технология производства серного удобрения с активированным торфом и глауконитовым эфелем

© 2019. Ю. Н. Терентьев¹, главный технолог,

Н. В. Сырчина², к. х. н., доцент, с. н. с.,

Т. Я. Ашихмина^{2,3}, д. т. н., профессор, г. н. с., зав. лабораторией,

Г. Я. Кантор^{2,3}, к. т. н., н. с.,

¹ ООО «РГ-АСУ-НАЛАДКА»,

142100, Российская Федерация, Московская область,

г. Подольск, ул. Фёдорова, д. 34, стр. 2,

² Вятский государственный университет,

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

³ Институт биологии Коми НЦ УрО РАН,

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

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

Сера наряду с азотом, фосфором и калием, входит в число важнейших элементов минерального питания растений. В последние годы в большинстве стран с развитым земледелием складывается отрицательный баланс между поступлением и выносом серы из почвы. В условиях снижения загрязнения атмосферы диоксидом серы и недостаточным использованием органических удобрений наиболее перспективной формой устранения дефицита серы в агрозёмах становятся серосодержащие минеральные удобрения. Удобрения на основе свободной серы (S⁰) вызывают в последнее время особый интерес, поскольку обладают рядом преимуществ по сравнению с другими формами серосодержащих удобрений – отсутствие балластных компонентов, низкая стоимость, пролонгированный период действия, совместимость с другими видами удобрений.

В статье предлагается технология производства комплексного органоминерального удобрения на основе глауконитсодержащего эфеля, торфа и порошковой серы. Лабораторные испытания показали, что через две недели после внесения удобрения в почву статистически достоверно увеличивается содержание подвижной серы и подвижного фосфора в составе агрозёма, что обусловлено жизнедеятельностью почвенных сероокисляющих микроорганизмов.

Ключевые слова: серные удобрения, органоминеральные удобрения, натуральные удобрения, активированный торф, сероторфяная суспензия, глауконитсодержащий эфель, глауконит, дефицит серы в почве.

Natural sulfur fertilizer with activated peat and glauconitic efel

© 2019. Yu. N. Terentyev¹

N. V. Syrchina²

T. Ya. Ashikhmina^{2,3}

G. Ya. Kantor^{2,3}

¹ LLC "RG-ASU-NALADKA",

Building 2, 34, Fedorova St., Podolsk, Moscow Region, Russia, 142100,

² Vyatka State University,

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

³ Institute of Biology of Komi Scientific Centre of the Ural Branch of RAS,

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

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

In recent years, in most countries with developed agriculture there is a negative balance between the supply and removal of sulfur from the soil. In conditions of decreasing atmospheric pollution with sulfur dioxide and insufficient use of organic fertilizers, sulfur-containing mineral fertilizers become the most promising form of eliminating sulfur deficiency in agrozems. Fertilizers based on free sulfur (S⁰) have recently been of particular interest because they have a number of advantages over other forms of sulfur-containing fertilizers – the absence of ballast components, low cost, a prolonged period of validity, compatibility with other types of fertilizers.

The article proposes a technology for the production of complex organomineral fertilizers (OMF) based on glauconite-containing eifel (dredging waste), peat and powdered sulfur. Sulfur and peat are included in the fertilizer in the form of sulfur-peat suspension obtained by the method of activation of sulfur-peat pulp by ultrasound cavitation. In the process of cavitation treatment, the sulfur-peat suspension is enriched with a complex of soluble humic substances. The finished fertilizer form is a fire and explosion-proof granulated product containing fine sulfur with a particle size of 0.05–0.10 mm. When introduced into moist soil, the granules easily disperse, which ensures a sufficient rate of microbiological oxidation from S^0 to SO_4^{2-} . The inclusion of activated peat and glauconite-containing eifel into the OMF composition eliminates the danger of substantial acidification of the soil solution by sulfur oxidation products, and also facilitates the process of granulating the mixture of raw materials. Laboratory tests have shown that two weeks after fertilizing the soil, the content of mobile sulfur and mobile phosphorus in the agrozem increases statistically significantly, due to the vital activity of sulfur-oxidizing soil microorganisms. The increase in the mobility of phosphorus may be due to the chemical activation of poorly soluble phosphorus compounds contained in the soil and eifel under the influence of sulfuric acid formed during the oxidation of sulfur. The production technology of fertilizer is completely waste-free and meets the principles of “green chemistry”. Production of OMF can be organized at enterprises of any capacity. The advantages and competitive advantages of fertilizer include relatively low cost, compatibility with other types of fertilizers, a long period of validity, lack of acidifying effect when applied to the soil, the presence in the fertilizer, except for the main active ingredient (S^0), phosphorus, potassium and humus components.

Keywords: sulfur fertilizers, organomineral fertilizers, natural fertilizers, activated peat, sulfur-peat suspension, glauconite-containing eifel, glauconite, sulfur deficiency in the soil.

Сера наряду с азотом, фосфором и калием, входит в число важнейших элементов минерального питания растений. Недостаток серы негативно отражается на процессах фотосинтеза, дыхания, азотного и углеводного обмена. В условиях дефицита серы уменьшается накопление белка в выращиваемых культурах, что приводит к снижению качества получаемого урожая [1–5]. Потребность растений в сере сопоставима с потребностью в фосфоре. По разным оценкам, вынос этого элемента с урожаем зерновых культур составляет 10–18 кг/га, а с урожаем крестоцветных может превышать 100 кг/га [6]. Растения поглощают серу в основном корневой системой в форме сульфат-ионов (SO_4^{2-}). Однако некоторое количество серы растения могут усваивать и в форме диоксида серы (SO_2) из воздуха через листья [7]. Вынос серы из агроэкозона компенсируется за счёт внесения серосодержащих минеральных и органических удобрений, а также за счёт абсорбции SO_2 из атмосферы или поступления сернистых соединений в почву с атмосферными осадками [8].

В последние годы в большинстве стран с развитым земледелием складывается отрицательный баланс между поступлением и выносом серы из почвы [9, 10]. Основными причинами развивающегося дисбаланса являются уменьшение техногенных выбросов сернистых соединений в атмосферу, а также ограниченный уровень внесения органических и серосодержащих минеральных удобрений [11]. В условиях снижения загрязнения атмосферы диоксидом серы и недостаточного использования органических удобрений наиболее перспективной формой устранения дефицита серы в агроэкозонах становятся серосодержащие минеральные удобрения.

Сера в состав минеральных удобрений может входить в растворимой форме (сульфаты и тиосульфаты аммония, калия, магния, тиосульфат кальция), в форме малорастворимых соединений (гипс) или в свободном виде (S^0). Удобрения на основе S^0 вызывают в последнее время особый интерес, поскольку обладают рядом преимуществ по сравнению с другими формами серосодержащих удобрений [12, 13]. К числу таких преимуществ следует отнести отсутствие в свободной сере балластных компонентов, низкую стоимость, пролонгированный период действия, совместимость с другими видами удобрений. Кроме того, производство S^0 -удобрений не требует химической обработки исходного сырья, что существенно снижает опасность загрязнения окружающей среды отходами производства. В отличие от всех остальных форм серосодержащих удобрений, S^0 можно отнести к категории натуральных безбалластных удобрений, производство и применение которых не приводит к загрязнению окружающей среды и выращиваемой продукции тяжёлыми металлами и другими токсичными соединениями.

Сера в свободном виде не усваивается растениями, однако в почвах под влиянием сероокисляющих гетеротрофных бактерий и грибов S^0 постепенно окисляется до $S(VI)$, т. е. до ионов SO_4^{2-} , которые и поглощаются корневой системой. Скорость окисления зависит не столько от видового состава S^0 -окисляющей микрофлоры, сколько от складывающихся почвенно-климатических условий (структуры, химического состава и pH почвы, температуры, характера увлажнения, окислительно-восстановительного потенциала, характера аэрации) [14, 15]. Несмотря на существенные преимущества S^0 по сравнению с другими фор-

мами серосодержащих удобрений, использование этого материала в агрохимии сопряжено с определёнными проблемами. Известно, что S^0 эффективно окисляется почвенной микрофлорой только в тонкодисперсном состоянии [16], вместе с тем внесение сильно пылящего порошка серы в почву представляет угрозу для здоровья человека и животных. Кроме того, молотая сера является пожаро- и взрывоопасным материалом, что накладывает дополнительные требования на условия её транспортирования, хранения и применения. Внесение повышенных доз S^0 в почвы приводит к заметному снижению рН почвенного раствора. Данный эффект может оказать негативное влияние на плодородие кислых почв. Соответствующие проблемы должны быть учтены и минимизированы при производстве эффективных и безопасных S^0 -удобрений.

Цель работы состояла в разработке состава и технологии производства натурального гранулированного серосодержащего удобрения пролонгированного действия на основе молотой серы и других экологически безопасных природных материалов, оказывающих положительное влияние на плодородие почв.

При проектировании состава удобрения учитывались следующие технологические и агроэкологические аспекты:

- удобрение должно представлять собой пожаро- и взрывобезопасный гранулированный продукт, содержащий тонкодисперсную серу с размером частиц 0,05–0,10 мм. При внесении во влажную почву гранулы должны легко рассыпаться, что необходимо для обеспечения достаточной скорости микробиологического окисления S^0 до SO_4^{2-} ;

- в состав удобрения должны быть включены компоненты, обеспечивающие возможность нейтрализации избыточной кислотности почв;

- в состав удобрения должны быть включены компоненты, оказывающие положительное влияние на жизнедеятельность почвенной микрофлоры и устойчивость растений к кислотному стрессу, который может быть вызван образующейся серной кислотой.

Объекты и методы

В качестве источника серы в составе удобрения использовалась сера молотая для сельского хозяйства, содержащая не менее 99,4% S^0 (ГОСТ 127.5-93). Кроме серы в состав удобрения были включены низинный торф высокой степени разложения и глауконитсо-

держащий эфель (побочный продукт добычи и обогащения фосфоритной руды). Согласно составу, получаемое удобрение может быть отнесено к натуральным комплексным органоминеральным удобрениям (ОМУ).

Для получения ОМУ применялся торф Каринского предприятия Кировской области. Содержание гуминовых веществ в торфе составляло 2,7%, содержание фульвокислот – 0,45% (от массы сухого вещества). Определение соответствующих показателей выполнялось по методу И.В. Тюрина в модификации М.М. Кононовой и Н.П. Бельчиковой [17]. В процессе получения ОМУ торф в ультразвуковом кавитационном диспергаторе подвергался интенсивному кавитационному воздействию (активации), что способствовало переходу содержащихся в нём гуминовых компонентов в активное водорастворимое состояние, при этом содержание гумусовых кислот увеличивалось до $18 \pm 2\%$ (на сухое вещество торфа). Включение в состав удобрения торфяных компонентов было направлено на обеспечение следующих эффектов [18, 19]:

- интенсификацию жизнедеятельности почвенных (в том числе сероокисляющих) микроорганизмов;

- детоксикационное и мелиорирующее воздействие на почвы, улучшение почвенной структуры;

- усиление ферментативного аппарата клеток растений;

- активацию ростовых процессов надземных органов и корневой системы;

- оптимизацию процессов миграции элементов минерального питания.

Включаемый в состав ОМУ глауконитсодержащий эфель (ГЭ) отбирался на территории хвостохранилища Верхнекамского фосфоритного рудника в 2017 г. Данный сырьевой компонент представляет собой тяжёлый порошок тёмно-серого цвета с размером частиц менее 1 мм. Истинная плотность – $2400\text{--}2600 \text{ кг/м}^3$, насыпная – $1,8\text{--}1,9 \text{ г/см}^3$.

Состав ГЭ (% масс.): глауконит – 50 ± 5 ; фосфориты мелких фракций – 20 ± 5 ; смесь песка (SiO_2) и глинистого известняка – 30 ± 10 . Средний размер частиц – 0,65 мм (но не более 1 мм). Благодаря химическому составу и комплексу агрохимических характеристик ГЭ является перспективным материалом для использования в качестве самостоятельного удобрения или в качестве компонента других удобрений [20]. Содержащиеся в ГЭ фосфориты и известковые компоненты способствуют нейтрализации образующейся при окислении

S⁰ серной кислоты. Входящие в состав ГЭ фосфор, калий и микроэлементы (Cu, Zn, Co, Cr, Mo) существенно повышают удобрительную ценность ОМУ.

Наиболее значимым компонентом ГЭ является глауконит – природный калийсодержащий водный алюмосиликат слоистого строения. Для глауконита характерны выраженные сорбционные и ионообменные свойства. Внесение глауконита в почвы способствует повышению активности полезной почвенной микрофлоры, оптимизации минерального питания растений, улучшению физико-химических свойств агрозёмов [21, 22].

Кроме повышения агрохимической эффективности, за счёт включения в состав ОМУ торфа и глауконитсодержащего эфеля решались важные технологические задачи: торфяные компоненты выполняли роль связующего, облегчая процесс гранулирования смеси; наличие ГЭ обеспечивало взрыво- и пожаробезопасность готового продукта.

Образцы гранулированного серосодержащего ОМУ получали в лабораторных условиях. Технология включала следующие операции:

- подготовку сырьевых компонентов (высушивание, измельчение до 0,15 мм и просеивание ГЭ);
- обработку водной суспензии серы и торфа в ультразвуковом кавитационном диспергаторе с получением сероторфяной суспензии состава (%): торф – 20, сера – 20, вода – 60;

- смешивание ГЭ и сероторфяной суспензии в массовом отношении 3:2 до однородной пасты с расчётной влажностью 26%;

- получение крупки (способом протирания смеси через металлическую сетку с размером ячеек 2 x 2 мм);

- окатывание крупки на металлическом поддоне;

- подсушивание окатанной крупки до постоянной массы при температуре 90 °С.

Полученные таким образом гранулы выдерживали нагрузку до 1,8 кг на 1 гранулу (соответствующие прочностные характеристики позволяют транспортировать ОМУ в мешках или биг-бэгах).

Изучение влияния полученной формы серосодержащего удобрения на химический состав почвы выполнялось в лабораторных условиях. Определяемые показатели: рН_{водн.}, рН_{KCl}, P₂O_{5подв.}, SO₄²⁻, каталазная активность. Анализ почвы выполнялся через 2 недели после внесения добавок в почву. Продолжительность эксперимента определялась, исходя из результатов ранее выполненных исследований, согласно которым наиболее значимое изменение определяемых показателей наблюдалось через 15–20 дней после внесения соответствующих добавок в почву. В качестве почвы для выполнения эксперимента использовался агрозём, отобранный на пахотном поле вблизи г. Кирова с глубины 5–10 см. Данные о химическом составе агрозёма приведены в таблице 1.

Таблица 1 / Table 1
Свойства агрозёма, используемого для проведения эксперимента
Properties of agrozem used for the experiment

№	Показатели / Indicators	Значение / Value	Метод определения / Determination method
1	рН _{водн.} , ед. рН / рН _{water} , unit of pH	7,3±0,1	ГОСТ/GOST 26483-85
2	рН _{KCl} , ед. рН / рН _{KCl} , unit of pH	6,5±0,1	ГОСТ/GOST 26483-85
3	Органическое вещество, % Organic matter, %	3,6±0,1	ГОСТ/GOST 26213-91
4	Фосфор подвижный (P ₂ O ₅), мг/кг Mobile phosphorus (P ₂ O ₅), mg/kg	80,7±16,1	ГОСТ P/GOST R 54650-2011
5	Калий обменный (K ₂ O), мг/кг Exchange potassium (K ₂ O), mg/kg	12,4±1,2	ГОСТ/GOST 26210-91
6	Нитраты, мг/кг / Nitrates, mg/kg	130±26	ГОСТ/GOST 26951-86
7	Сера подвижная (SO ₄ ²⁻), мг/кг Mobile sulfur (SO ₄ ²⁻), mg/kg	5,8±0,8	ГОСТ/GOST 26426-85
8	Механический состав Mechanical composition	средний суглинок / medium loam	по Н.А. Качинскому мокрым методом / wet method by N. Kachinsky
9	Каталазная активность, мл/г/2 мин Catalase activity, ml/g/2 min	6,3±0,2	газиметрическим методом по Ф.Х. Хазиеву / gasometric method by F. Khaziyeu

Варианты эксперимента: 1) контроль – агрозём без добавок; 2) агрозём + сера (5 мг/кг, или 22 кг/га); 3) агрозём + серо-торфяная суспензия (10 мг/кг (в расчёте на сухое вещество), или 44 кг/га); 4) агрозём + глауконит-содержащий эфель (37 мг/кг или 163 кг/га); 5) агрозём+ ОМУ (47 мг/кг, или 207 кг/га).

Подготовленные образцы агрозёма (грунта) загружались в пластиковые контейнеры, увлажнялись деионизованной водой до 60% от полной влагоёмкости и выдерживались в комнатных условиях (22±2 °С) в течение всего эксперимента. Масса грунта в каждом контейнере составляла 1 кг. Уровень влажности контролировался гравиметрически: при снижении массы контейнера с грунтом на 5%, в него добавлялась деионизованная вода. Эксперимент проводился в 3-х повторностях, полученные результаты обрабатывались стандартным методом (оценка уровня значимости отличия опыта от контроля по критерию Стьюдента).

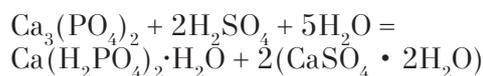
Результаты и обсуждение

В таблице 2 представлены данные о влиянии внесённых добавок на свойства агрозёма (согласно вариантам эксперимента).

Представленные в таблице 2 результаты свидетельствуют о том, что внесение в агрозём ОМУ (вариант 5) позволяет получить более выраженный агрохимический эффект, чем внесение молотой серы (вариант 2), сероторфяной суспензии (вариант 3) или ГЭ (вариант 4). Внесение ОМУ в агрозём приводит к существенному повышению содержания растворимых сульфатов, при этом снижения рН не наблюдается. Отсутствие подкисляющего эффекта объясняется наличием в ОМУ

компонентов (фосфатов и карбонатов кальция), способных эффективно связывать катионы Н⁺. Соотношение серы и нейтрализующих компонентов в предлагаемом составе ОМУ позволяет полностью устранить возможный эффект подкисления.

Под влиянием ОМУ повышается содержание подвижного фосфора в почвах. Данный эффект может быть обусловлен химической активацией содержащихся в почве и ГЭ малорастворимых соединений фосфора. Активирующим агентом выступает серная кислота, образующаяся в результате биохимического окисления S⁰:



Аналогичный процесс реализуется при получении суперфосфата в производственных условиях, однако химическая переработка фосфатных руд является достаточно затратным и экологически опасным процессом, приводящим к загрязнению окружающей среды продуктами кислотного разложения исходного сырья и отходами производства.

Полученные в результате экспериментальных исследований данные были использованы для разработки технологической схемы производства натурального ОМУ, включающего серу молотую для сельского хозяйства (ГОСТ 127.5-93), торф высокой степени разложения и глауконитсодержащий эфель Верхнекамского фосфоритного рудника. Запасы ГЭ на территории хвостохранилища в настоящее время достигают 24 млн т. Вовлечение данного сырья в переработку может иметь большое практическое значение для развития экономики Верхнекамского района Кировской области.

Таблица 2 / Table 2

Изменение состава агрозёма через 2 недели после внесения добавок
Change in the composition of agroseme 2 weeks after the introduction of additives

№	Показатели / Indicators	Варианты эксперимента / Variants				
		1	2	3	4	5
1	рН _{водн.} , ед. рН / рН _{water} , unit of рН	7,3±0,1	7,0±0,1	7,3±0,1	7,4±0,3	7,3±0,1
2	рН _{КCl} , ед. рН / рН _{KCl} , unit of рН	6,5±0,1	6,3±0,1	6,7±0,1	6,7±0,4	6,7±0,1
3	Фосфор подвижный (P ₂ O ₅), мг/кг Mobile phosphorus (P ₂ O ₅), mg/kg	80,7±16,1	86,3±17,3	86,4±17,3	110,4±22,1	122,1±24,4
4	Сера подвижная (SO ₄ ²⁻), мг/кг Mobile sulfur (SO ₄ ²⁻), mg/kg	5,8±0,8	9,3±1,3	9,4±1,3	6,1±0,9	11,2±1,6
5	Каталазная активность, мл/г/2 мин / Catalase activity, ml/g/2 min	6,3±0,2	6,7±0,3	6,6±0,2	6,9±0,3	6,7±0,7

Примечание: жирным шрифтом выделены значения, отличающиеся от контрольных с достоверностью более 0,95.

Note: values in bold are different from the control ones with a confidence level of more than 0.95.

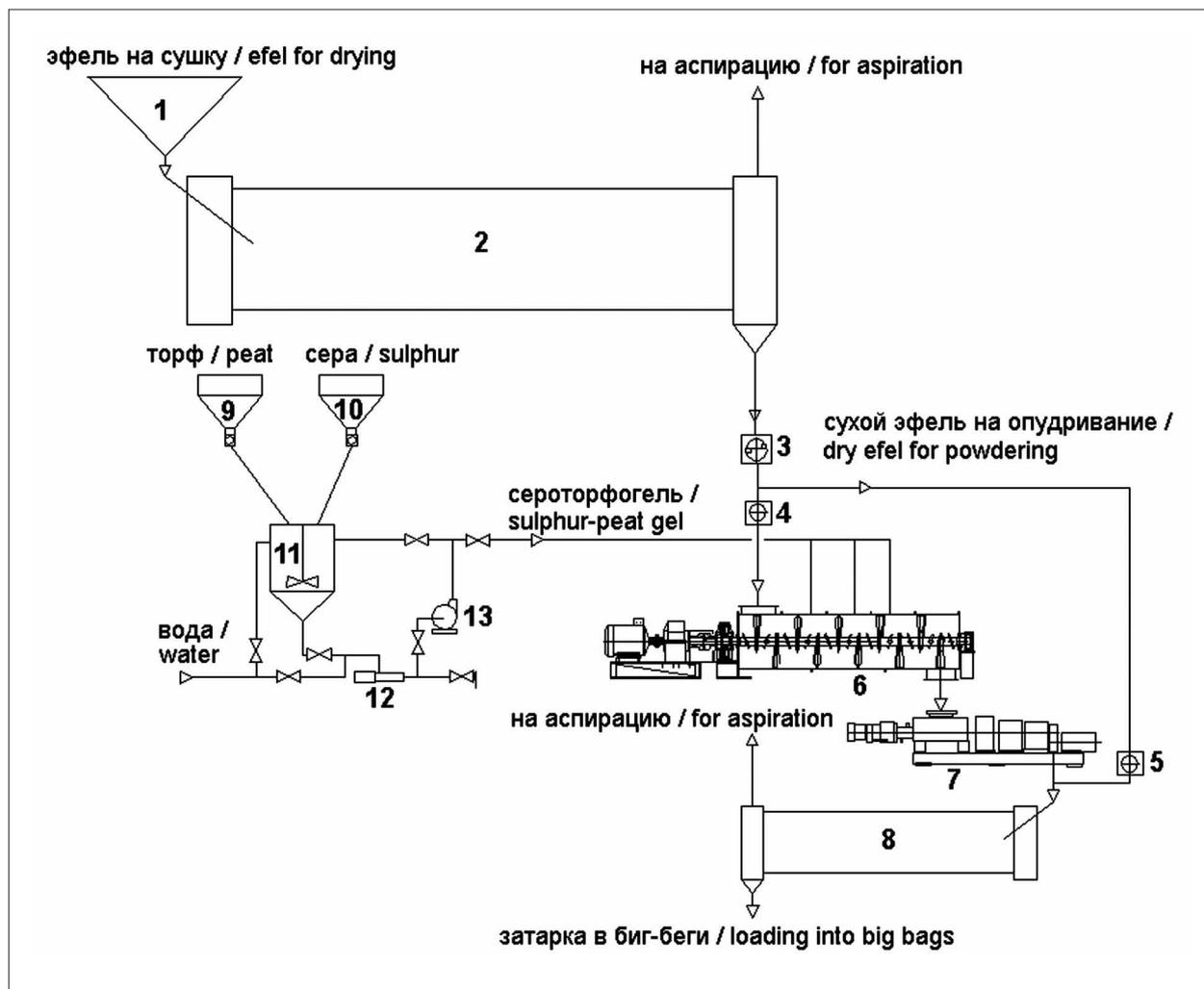


Рис. Общая технологическая схема производства ОМУ: 1 – бункер исходного эфеля на сушку; 2 – барабанная сушилка; 3 – молотковая дробилка; 4 – шлюзовый накопитель эфеля на грануляцию; 5 – шлюзовый питатель эфеля на опудривание; 6 – двухвальный смеситель; 7 – гранулятор формования; 8 – барабанный холодильник-опудриватель гранул; 9 – бункер торфа; 10 – бункер порошковой серы; 11 – бак с мешалкой; 12 – винтовой насос; 13 – кавитационный диспергатор РИА-250
Fig. The general technological scheme for the production of organic-mineral fertilizer: 1 – the bunker of the initial efel for drying; 2 – drum dryer; 3 – hammer crusher; 4 – device of efel storage for granulation; 5 – gateway feeder for dusting; 6 – twin shaft mixer; 7 – molding granulator; 8 – drum cooler-powdering device; 9 – peat bunker; 10 – sulfur powder bunker; 11 – tank with stirrer; 12 – screw pump; 13 – cavitation disperser RIA-250

Общая технологическая схема производства ОМУ представлена на рисунке.

Соответствующая схема включает следующие операции:

Высушивание исходного ГЭ до влажности 3% с последующим пропуском через молотковую дробилку со степенью измельчения $N = 4$ и грохот для получения однородного мелкодисперсного порошка со средним размером частиц 0,15 мм.

Приготовление серо-торфяной суспензии с помощью ультразвукового кавитационного диспергатора. Содержание компонентов в суспензии (масс. %): сера – 20; торфяные компоненты – 20; вода – 60.

Смешивание подготовленного ГЭ (60 масс.%) и сероторфяной суспензии (40 масс.%) в двухвалковом смесителе. В 100 кг полученной смеси будет содержаться: глауконита – 30 кг (в которых калия в виде K_2O 1,5 кг); фосфоритов – 12 кг (в которых фосфора в виде P_2O_5 – 2,8 кг); песка и глинистого известняка – 16 кг; воды эфеля – 2 кг; сухого остатка торфа – 8 кг (в которых гумусовых кислот 1,5 кг); серы (S^0) – 8 кг; воды серо-торфяной суспензии – 24 кг. Влажность полученной смеси (пасты) составит 26 масс. %.

Обработка пасты в турболопастном смесителе-грануляторе для получения крупки размером 1–1,5 мм.

Опудривание крупки высушенным измельчённым ГЭ.

Соответствующая крупка будет представлять собой серно-фосфорно-калийное ОМУ с гуматами. Благодаря высокой водопоглощающей способности глауконита (145% от массы исходного глауконита), дополнительное подсушивание полученной крупки не требуется.

Состав полученного таким образом ОМУ отвечает формуле: SPK -гумат 8:3:1,5-0,5. Содержание глауконита в ОМУ будет составлять 30 масс. %.

При цене исходного торфа 1700 руб./т, эфеля – 1700 руб./т, элементарной серы – 5000 руб./т цеховая себестоимость указанного удобрения составит около 8000 руб./т, что обеспечивает конкурентоспособность ОМУ на рынке минеральных и органоминеральных удобрений.

Заключение

В результате выполненных исследований были разработаны состав и технологическая схема производства натурального гранулированного серного удобрения пролонгированного действия на основе экологически безопасных природных материалов (молотой серы, фосфоритной муки, глауконита, торфа). Актуальность исследований в направлении оптимизации форм и способов применения S^0 в качестве удобрения обусловлена как низкой стоимостью и экологической безопасностью этого материала, так и существенными ресурсами серы, образующейся в нашей стране в качестве побочного продукта переработки нефти и газа. Рациональное использование соответствующих ресурсов имеет большое природоохранное и экономическое значение.

Технология производства удобрения полностью безотходна и отвечает принципам «зелёной химии». Производство ОМУ может быть организовано на предприятиях любой мощности. К достоинствам и конкурентным преимуществам удобрения следует отнести относительно низкую стоимость, совместимость с другими видами удобрений, продолжительный период действия, отсутствие подкисляющего эффекта при внесении удобрения в почву, наличие в удобрении, кроме основного действующего вещества (S^0), фосфора, калия и гумусовых компонентов. Соответствующее ОМУ предназначено для внесения в почвы, характеризующиеся низким содержанием подвижных сульфатов. Наличие в составе удо-

брения тонкодисперсной серы может способствовать проявлению фунгицидного действия, что имеет большое практическое значение для защиты выращиваемых растений от поражения патогенными грибами. Особый интерес соответствующее удобрение может представлять для внесения под такие культуры, как рапс, пшеница, бобовые. В отличие от растворимых серосодержащих удобрений (сульфаты аммония, калия и др.), ОМУ может вноситься в почвы в осенний период. В условиях низких температур микробиологические процессы окисления серы приостанавливаются, поэтому сульфаты в почве не накапливаются, что минимизирует вымывание действующих веществ ОМУ с талыми водами. Благодаря глаукониту удобрение хорошо удерживает воду. Наличие адсорбированной воды имеет большое значение для обеспечения достаточной скорости микробиологического окисления серы в верхних горизонтах почвы, что повышает ценность ОМУ для засушливых регионов РФ, Кавказа, Средней Азии и др.

References

1. Slyusarev V.N. Sulfur in the soils of Caucasian Northwest (agroecological aspects). Krasnodar: KubGAU, 2007. 230 p. (in Russian).
2. Bakry A.B., Sadak M.Sh., El-karamany M.F. Effect of humic acid and sulfur on growth, some biochemical constituents, yield and yield attributes of flax grown under newly reclaimed sandy soils // Journal of Agricultural and Biological Science. 2015. V. 10. No. 7. P. 247–259.
3. Förster S., Welp G., Scherer H.W. Sulfur specification in bulk soil as influenced by long-term application of mineral and organic fertilizers // Plant soil environ. 2012. V. 58. No. 7. P. 316–324. doi: 10.17221/32/2012-PSE
4. Eriksen J., Mortensen J.V. Effects of timing of sulphur application on yield, S-uptake and quality of barley // Plant and Soil. 2002. V. 242. No. 2. P. 283–289. doi: 10.1023/A:1016224209654
5. Houhou M., Joutei K.A., Rais C., Elghadraoui L., Louahlia S. Biomass partitioning and morphological parameters of *Trigonella foenum-graecum* submitted to sulfur deficiency // Indian Journal of Plant Physiology. 2018. V. 23. No. 1. P. 118–127. doi: 10.1007/s40502-018-0351-2
6. Aristarkhov A. Sulfur in agroecosystems of Russia: monitoring of their content in soils and efficiency of application // Mezhdunarodnyi selskokhozyaystvennyi zhurnal. 2016. No. 5. P. 39–47 (in Russian).
7. Katase M., Ushijima T., Tazaki T. The relationship between absorption of sulfur dioxide (SO_2) and inhibition of photosynthesis in several plants // Journal of Plant Research. 1983. V. 96. No. 1. P. 1–13. doi: 10.1007/BF02489570

8. Bristow A.W., Garwood E.A. Deposition of sulphur from the atmosphere and the sulphur balance in four soils under grass // *The Journal of Agricultural Science*. 1984. V. 103. No. 2. P. 463–468. doi: 10.1017/S0021859600047444
9. Guzys S., Aksomaitiene R. Migration of sulphur in limed soils differing in agricultural management // *Nutrient Cycling in Agroecosystems*. 2005. V. 71. No. 2. P. 191–201. doi: 10.1007/s10705-004-3175-6
10. Kulhánek M., Balík J., Černý J., Sedlár O., Vašák F. Evaluating of soil sulfur forms changes under different fertilizing systems during long-term field experiments // *Plant Soil Environ*. 2016. V. 62. No. 9. P. 408–415. doi: 10.17221/236/2016-PSE
11. Boye K., Nilsson S.I., Eriksen J. Net sulfur mineralization potential in Swedish arable soils in relation to long-term treatment history and soil properties // *Biology and Fertility of Soils*. 2009. V. 45. No. 7. P. 743–751. doi: 10.1007/s00374-009-0390-y
12. Zhao C., Degryse F., Vadakattu G., McLaughlin M. Modelling of sulfur oxidation from elemental sulfur // *Plant and Soil*. 1993. V. 155–156. No. 1. P. 379–382. doi: 10.1007/BF00025062
13. McLaughlin M.J., Degryse F., da Silva R.C., Baird R. Co-granulated elemental sulfur/sulfate fertilizers and their role in crop nutrition // *Better Crops*. 2015. V. 99. No. 3. P. 7–10.
14. Zhao C., Vadakattu V.S.R.G., Degryse F., McLaughlin M.J. Abundance and diversity of sulphur-oxidising bacteria and their role in oxidising elemental sulphur in cropping soils // *Biology and Fertility of Soils*. 2017. V. 53. No. 2. P. 159–169. doi: 10.1007/s00374-016-1162-0
15. Germida J.J., Janzen H.H. Factors affecting the oxidation of elemental sulfur in soils // *Fertilizer research*. 1993. V. 35. No. 1–2. P. 101–114. doi: 10.1007/BF00750224
16. Boswell C.C., Friesen D.K. Elemental sulfur fertilizers and their use on crops and pastures // *Fertilizer research*. 1993. V. 35. No. 1–2. P. 127–149. doi: 10.1007/BF00750226
17. Kononova M.M., Belchikova N.P. Accelerated methods for determining the composition of humus of mineral soils // *Pochvovedeniye*. 1961. No. 10. P. 75–87 (in Russian).
18. Kirdey T.A. Humic preparations in agrotechnologies // *Zemledeliye*. 2013. No. 5. P. 12–14 (in Russian).
19. Bykova S.L., Sokolov D.A., Nechaeva T.V., Zherebtsov S.I., Ismagilov Z.R. Agroecological assessment of the use of humates in the reclamation of technologically disturbed landscapes // *Vestnik KuzGTU*. 2013. No. 5 (99). P. 58–61 (in Russian).
20. Syrchina N.V., Kozvonin V.A., Sazanov A.V. Glauconite sands of the Vyatka-Kama field and prospects for their practical use in agriculture // *Soils of Russia: yesterday, today, tomorrow. Sbornik statey po materialam Vserossiyskoy s mezhdunarodnym uchastiem nauchnoy konferentsii, posvyashchennoy Godu ekologii i 90-letiyu so dnya rozhdeniya professora V.V. Tyulina*. Kirov, 2017. P. 108–113 (in Russian).
21. Levchenko M.L. The state of the resource base and the possibility of using glauconites in Russia // *Mineralnye resursy Rossii. Ekonomika i upravlenie*. 2008. No. 2. P. 27–31 (in Russian).
22. Terentyev Yu.N., Syrchina N.V., Bogatyryova N.N., Ashikhmina T.Ya., Sazanov A.V., Sazanova M.L., Pugach V.N., Kozvonin V.A., Burkov A.A. The use of glauconite for stabilization and improvement of ammonium nitrate agrochemical properties // *Theoretical and Applied Ecology*. 2018. No. 4. P. 61–67. doi: 10.25750/1995-4301-2018-4-061-067

Экологическое оздоровление и сохранение уникальной водной системы реки Волги: вопросы законодательного обеспечения

© 2019. Р. Н. Салиева^{1,2}, д. ю. н., профессор, зав. лабораторией,
В. З. Латыпова^{1,2}, д. х. н., профессор, член-корреспондент
Академии наук Республики Татарстан, профессор, г. н. с.,
И. Р. Салиев³, к. ю. н., старший преподаватель,

¹Институт проблем экологии и недропользования АН РТ,
420087, Россия, Республика Татарстан, г. Казань, ул. Даурская, д. 28,

²Казанский (Приволжский) федеральный университет,
Институт экологии и природопользования,

420008, Россия, Республика Татарстан, г. Казань, ул. Кремлевская, д. 18,
³Казанский институт (филиал)

«Всероссийского государственного университета юстиции (РПА Минюста России)»,
420126, Россия, Республика Татарстан, г. Казань,

ул. Фатыха Амирхана, д. 12 а, к. 1,

e-mail: sargus6@yandex.ru, ecoanrt@yandex.ru, info@kazanrpa.ru

В работе даётся краткий анализ современного экологического состояния Волжского бассейна, основных, в целом схожих для приволжских регионов, проблем, связанных, главным образом, с протеканием практически неконтролируемых процессов, вызванных антропогенной нагрузкой, и реально угрожающих состоянию Волги. Приводится обзор и анализ основных законодательных актов и программных (стратегических) документов, в которых предусмотрены меры, направленные на сохранение и экологическое оздоровление реки Волги. Показано, что, несмотря на предпринимаемые законодательные меры и меры по реализации программ оздоровления Волги, экологическое состояние Волги не улучшается. Отмечается, что причинами этого могут быть слабая востребованность современных научных разработок, а также отсутствие системного подхода к решению экологических проблем бассейна Волги. Подчёркивается, что современное экологическое состояние Волжского бассейна требует дальнейшего совершенствования законодательства, предусматривающего организационные и правовые меры, способствующие реальному улучшению экологического состояния Волги. В решении комплексных проблем сохранения и оздоровления Волги пересекаются отношения, регулируемые нормами разных отраслей законодательства: природоохранного, водного, в сфере водоснабжения и водоотведения, обеспечения санитарно-эпидемиологического благополучия и др. Целесообразность объединения норм, содержащихся в разрозненных нормативных правовых актах, в одном нормативном документе обосновывает важность и своевременность выдвинутой коллективом поволжских учёных с участием авторов статьи идеи о разработке проекта федерального закона «Об охране Волги».

Ключевые слова: река Волга, экологическое состояние, источники негативного воздействия, нормативно-правовое регулирование, нормы законодательства.

Ecological improvement and preservation of the unique water system of the Volga River: issues of legislative support

© 2019. R. N. Salieva^{1,2} 0000-0003-0278-4948[†]

V. Z. Latypova^{1,2} ORCID: 0000-0002-8490-6939[†], I. R. Saliev³ ORCID: 0000-0002-9026-3503[†]

¹Institute for Problems of Ecology and Mineral Wealth Use
of Tatarstan Academy of Sciences,

28, Daur'skaya St., Kazan, Republic of Tatarstan, Russia, 420087,

²Kazan (Volga Region) Federal University,

18, Kremlevskaya St., Kazan, Republic of Tatarstan, Russia, 420008,

³Kazan Institute (Branch) of the All-Russian State University of Justice
(Russian Law Academy of the Ministry of Justice of Russia),

building 1, 12a, Fatykha Amirkhana St., Kazan,

Republic of Tatarstan, Russia, 420126,

e-mail: sargus6@yandex.ru, ecoanrt@yandex.ru, info@kazanrpa.ru

The paper gives a brief analysis of the current ecological state of the vast Volga basin, the main generally similar problems associated mainly with the flow of almost uncontrolled processes caused by anthropogenic load, and really threatening to the state of the Volga. A brief review and analysis of legislative acts and policy documents, which provide for measures aimed at the preservation and environmental improvement of the Volga River. It is shown that, despite the efforts of legislative measures and measures for the implementation of programs of rehabilitation of the Volga river, the ecological state of the Volga is not improving. The reasons for this may be the low demand for modern scientific developments, as well as the lack of a systematic approach to solving environmental problems of the Volga basin. It is noted that the current ecological state of the Volga basin requires further improvement of the legislation providing for organizational and legal measures that contribute to the real improvement of the ecological state of the Volga. The importance and timeliness of the proposal to develop a draft Federal Law "On the protection of the Volga River", the feasibility of which was justified by a team of Volga scientists environmentalists with the participation of the authors of the article. An integrated approach to solving the problems of preservation and improvement of the Volga River is due to the fact that in this area intersect relations regulated by the norms of different branches of legislation: environmental, water, as well as legislation in the field of water supply and sanitation, legislation in the field of sanitary and epidemiological welfare, etc. Therefore, it would be advisable to combine the rules governing the establishment of standards and the discharge into the river of wastewater and other water to be treated, the order of elimination of accumulated environmental damage, the order of organization and implementation of state monitoring of the Volga, including in terms of the organization and monitoring of the content of pollutants in the bottom sediments of the Volga, the procedure for bringing to responsibility for causing harm to the Volga and other provisions contained in separate regulatory legal acts, in one regulatory document.

Keywords: Volga river, ecological state, sources of negative impact, regulatory and legal regulation, norms of legislation.

Волга – река в Европейской части России, одна из крупнейших рек земного шара, самая большая в России и в Европе (табл.). Площадь Волжского бассейна составляет 8% территории России. Нельзя представить себе Россию без реки Волги, как невозможно представить и понять историю нашего народа в отрыве от её водных богатств.

Экономическое развитие страны было немыслимо без широкого освоения водных ресурсов. Более двух веков последовательно проводилась реконструкция Волги – этого уникального символа России. Но, начиная с 30-х гг. прошлого века, после строительства гидроэлектростанций Волга впервые превратилась в каскад водохранилищ, что навсегда

нарушило привычный ход реки, коренным образом изменились её свойства; резко ухудшилось качество воды и снизилась самоочищаемость воды. Нагрузка на Волгу многократно превысила нагрузку на водные ресурсы в среднем по России [1]. Гидротехническое строительство в Волжском бассейне сыграло свою роль в подъёме экономики страны (энергетика, ирригация, индустриальное и городское водоснабжение, судоходство, рыбное хозяйство, лесосплав, борьба с наводнениями в период весенних паводков, рекреация и т. д.). Однако проекты строительства ГЭС не рассматривали проблему во всей её сложности и комплексности, глобально отсутствовали исследования потенциальных экологических послед-

Таблица / Table

Пять крупнейших рек Европы / The five largest rivers in Europe

№	Название Name	Длина, км Length, km	Площадь бассейна, тыс. км ² Area basin (thousand km)	Страны / Countries
1	Волга Volga	3530	1360	Российская Федерация (РФ) Russian Federation (RF)
2	Дунай Danube	2860	817	Германия, Австрия, Словакия, Венгрия, Болгария, Хорватия, Сербия, Румыния, Молдавия, Украина Germany, Austria, Slovakia, Hungary, Bulgaria, Croatia, Serbia, Romania, Moldova, Ukraine
3	Урал Ural	2428	237	Российская Федерация, Казахстан RF, Kazakhstan
4	Днепр Dnieper	2201	504	РФ, Беларусь, Украина RF, Belarus, Ukraine
5	Дон Don	1870	422	РФ RF

ствий такой масштабной реконструкции – выдержат ли такую нагрузку экологические системы бассейна Волги, что станет с гидробионтами, с волжской водой – производной жизни, с проходными рыбами, которым были преграждены пути к местам нереста и возможности воспроизводить потомство, а это ущерб былому богатству страны [2].

Предпринимаемые законодательные меры, направленные на сохранение и предотвращение загрязнения реки Волги, до сих пор не дают желаемого результата. Цель данной работы – характеристика современного экологического состояния Волжского бассейна, анализ нормативных правовых актов Российской Федерации, регламентирующих отношения в сфере обеспечения сохранения Волги, предотвращения её загрязнения и обоснование дополнительных предложений по разработке и принятию правовых мер, направленных на повышение эффективности правового регулирования отношений в сфере сохранения уникальных водных объектов в бассейне р. Волги.

Результаты исследования

Характеристика современного экологического состояния Волжского бассейна. Для водных объектов на водосборе р. Волги в целом характерны схожие проблемы, связанные, главным образом, с протеканием практически неконтролируемых процессов и реально угрожающих состоянию Волги. К их числу относятся, прежде всего, выпуски ливневой канализации крупных городов России, несущие грязевые потоки практически без очистки в поверхностные воды. Ещё более масштабным процессом является диффузный сток, поступающий с аграрно- и индустриально освоенных водосборов, населённых пунктов, объектов накопленного экологического вреда, с разгрузкой подземных вод, с речным стоком и т. д. Эти процессы запускают механизм антропогенного эвтрофирования в водах бассейна Волги и связанное с ними так называемое явление «цветения» воды за счёт избыточного поступления соединений биогенных элементов (углерод, фосфор, азот), заиления и обмеления рек за счёт поступления взвешенных веществ [2].

Характеризуя высокую антропогенную нагрузку на волжский водосбор, можно отметить, что в бассейне Волги сосредоточено около 45% промышленного и примерно 50% сельскохозяйственного производства России [3, 4].

В сфере водоотведения и очистки сточных вод предприятий лишь 45% объёма сточных вод, отводимых в поверхностные воды, очищается до нормативного уровня [5]. Как отмечается в работе [6], «на сегодня выделено 69 «горячих точек» в различных регионах Волжского бассейна. По многим из них уже практически ведётся работа и сейчас формируется перечень остальных объектов, исходя из рейтинга их опасности».

Анализ стратегических и программных документов в сфере сохранения и предотвращения загрязнения Волги. В 2009 г. распоряжением Правительства РФ от 27.08.2009 № 1235-р была утверждена Водная стратегия Российской Федерации на период до 2020 г. [7], в которой ряд пунктов был посвящён различным аспектам водохозяйственной деятельности в бассейне Волги. В указанном документе, в частности, были отмечены такие проблемы, как некомплексное использование водных ресурсов; необходимость системного переустройства водохозяйственного комплекса для оптимизации использования водных ресурсов в целях водоснабжения населения, сельскохозяйственного производства, рыбного хозяйства, сокращения холостых сбросов и потерь выработки электроэнергии на гидроэлектростанциях Волжско-Камского каскада, а также сохранения уникальной экосистемы Волго-Ахтубинской поймы и дельты р. Волги; высокая степень загрязнения водных объектов и низкое качество воды; техногенное загрязнение подземных вод; необходимость сокращения антропогенного воздействия на водные объекты и их водосборные территории; а также необходимость предотвращения деградации малых рек; охраны и предотвращения загрязнения подземных водных объектов и др.

В настоящее время в Российской Федерации реализуется приоритетный проект «Сохранение и предотвращение загрязнения реки Волги» («Оздоровление Волги») [8] в соответствии с перечнем поручений Президента Российской Федерации В.В. Путина от 05.12.2016 № Пр-2346, рассчитанный на период 2016–2025 гг. [9]. Его цель – предотвращение загрязнения бассейна Волги, улучшение экологического состояния Волги и её притоков, восстановление и улучшение качества воды. Проект должен завершиться созданием Концепции по снижению загрязнений в пилотных регионах, в том числе в Республике Татарстан; реализацией системы мер, направленных на рациональное использование водных ресурсов и устойчивое функциониро-

вание водохозяйственного комплекса Нижней Волги, сохранение уникальной системы Волго-Ахтубинской поймы и реализацией региональных проектов, направленных на сохранение и предотвращение загрязнения реки.

В своем ежегодном Послании Федеральному Собранию (1 декабря 2016 г.) Президент Российской Федерации В.В. Путин поручил Правительству Российской Федерации в 2017 г. «утвердить в рамках направления стратегического развития Российской Федерации «Экология» приоритетные проекты, направленные на сохранение и предотвращение загрязнения центральной экологической зоны реки Волги, а также на экологическое развитие указанных природных объектов и обеспечение соблюдения требований в области охраны окружающей среды» [9, п. 1.e].

Концепция федеральной целевой программы «Развитие водохозяйственного комплекса Российской Федерации в 2012–2020 годах» [10] также уделяет значительное внимание решению проблем низовьев р. Волги. В ней, в частности, отмечается, что: «А) Одной из наиболее важных водохозяйственных задач на Нижней Волге является создание оптимального гидрологического режима ниже Волгоградского гидроузла, прежде всего, в Волго-Ахтубинской пойме и дельте р. Волги. Не менее важной задачей является создание и поддержание условий обводнения западных подступных ильменей. В зоне устьевого взморья р. Волги необходимо создание оптимальных условий для прохода на нерест и обратно осетровых рыб, выращивания их мальков в зоне мелководья, а также поддержание судоходных глубин на Волго-Каспийском канале и необходимых глубин на рыбоводных каналах. Необходимы также защита застроенных берегов р. Волги от размыва и затопления, восстановление малых водотоков, поддержание судоходных глубин на отдельных участках коренного русла р. Волги, а также защита отдельных территорий от подтопления. В целом, в низовьях р. Волги требуется системное переустройство водохозяйственного комплекса для оптимизации использования водных ресурсов в целях водоснабжения населения, сельскохозяйственного производства, рыбного хозяйства, сокращения холостых сбросов и потерь выработки электроэнергии на гидроэлектростанциях Волжско-Камского каскада, а также сохранения уникальной экосистемы Волго-Ахтубинской поймы и дельты р. Волги; Б) В рамках решения задачи по экологической реабилитации водных объектов особое

внимание будет уделено мерам по экологическому оздоровлению водных объектов Нижней Волги и бассейна р. Амура».

Анализ нормативных правовых актов Российской Федерации, регламентирующих отношения в сфере обеспечения сохранения Волги и предотвращения её загрязнения, показывает, что создана достаточно большая законодательная основа.

В целом, водные отношения и правовые формы использования природных ресурсов регулируются Водным кодексом Российской Федерации [11, ст. 37, ст. 72].

Специальным Указом Президента Российской Федерации В.В. Путина «О национальных целях и стратегических задачах развития Российской Федерации на период до 2024 года» [12, п. 7.] дано поручение Правительству Российской Федерации обеспечить следующие цели и целевые показатели устойчивого функционирования водохозяйственного комплекса Нижней Волги и сохранения экосистемы Волго-Ахтубинской поймы: а) экологическое оздоровление водных объектов, включая реку Волгу; б) решение следующих задач: ...экологическая реабилитация водных объектов, в том числе реализация проекта, направленного на сокращение в три раза доли загрязнённых сточных вод, отводимых в реку Волгу, устойчивое функционирование водохозяйственного комплекса Нижней Волги и сохранение экосистемы Волго-Ахтубинской поймы; ...».

В Федеральном законе от 29 ноября 2018 г. № 459-ФЗ [13] предусмотрено значительное финансирование Федерального проекта «Оздоровление Волги» и мероприятий по ликвидации (рекультивации) объектов накопленного экологического вреда, представляющих угрозу реке Волге.

Помимо этого, были внесены также дополнения в Приказы специально уполномоченных министерств РФ. Так, Приказ Минприроды России от 01.06.2012 № 141 (ред. от 18.05.2018) [14, п. 3.1] предусматривает дополнительные субсидии на реализацию проекта «Оздоровление Волги» (абзац введён Приказом Минприроды России от 18.05.2018 № 208). Приказом Минтранса России от 19.01.2018 № 19 [15] утверждены Правила плавания судов по внутренним водным путям (в том числе по р. Волге).

В этот перечень нормативно-правовых актов следует включить и документы регионального уровня. Так, например, в Республике Татарстан в соответствии с п. 2 «Положения о порядке взимания платы за сброс

сточных вод и загрязняющих веществ в системы канализации организаций водопроводно-канализационного хозяйства», утверждённого постановлением Кабинета министров Республики Татарстан от 30.12.2004 № 589, и [16] принято Постановление Исполкома муниципального образования «Зеленодольский муниципальный район» от 22.12.2017 № 03-03-3242 «Нормы допустимых концентраций загрязняющих веществ в сточных водах абонентов» [17], установленные с целью недопущения негативного воздействия на водный объект (река Волга)».

В данной работе приведена лишь часть документов федерального и регионального законодательства, которое может быть без труда дополнено документами регионального и ведомственного уровня.

Рекомендации по совершенствованию правовых мер по улучшению состояния реки Волги. Проведённый анализ диктует целесообразность принятия дополнительных нормативных актов, направленных на устранение причин сложившегося экологического состояния реки Волги.

Как отметил президент РФ в своем ежегодном послании Федеральному собранию 1 марта 2018 г. [18], «на всей территории России мы должны обеспечить высокие стандарты экологического благополучия». Прежде всего, в рамках ужесточения экологических требований к предприятиям, с 2019 г. начинается постепенный переход российских предприятий на наилучшие доступные технологии, что, в частности, будет способствовать повышению эффективности очистки сточных вод.

В правовом поле России действуют многочисленные нормативно-методические документы, требующие внесения дополнений, которые были бы направлены на обеспечение сохранения и предотвращения загрязнения реки Волги. Например, ГОСТ Р 54003-2010 [19] по выявлению и ликвидации объектов накопленного ущерба от прошлой хозяйственной деятельности, актуален для предотвращения загрязнения водосбора реки Волги, но не содержит механизма выявления и оценивания накопленного вреда применительно к водным объектам.

Документ РД 52.24.620-2000 [20] требует дополнения перечня определяемых показателей цианотоксинами и соответствующими обоснованными нормами экологически безопасных уровней их содержания в воде водоисточников и в рекреационных зонах в условиях массового развития синезелёных

водорослей и связанного с ним так называемого устойчивого «цветения» волжских вод в последнее десятилетие.

Важное значение имеет установление единых терминов и понятий в указанных сферах правового регулирования. Так, целесообразно уточнение терминов «донный грунт», «дно водного объекта», «участок недр, расположенный ниже дна водоёмов». Необходимо также рассмотреть вопрос об отнесении донных грунтов (донных отложений) к ресурсам, являющимся государственной собственностью.

Учитывая внесённые ФЗ от 29.07.2017 № 225-ФЗ [21] изменения, Правительству РФ необходимо, в частности, разработать и принять «Порядок возмещения вреда, причинённого водному объекту при сбросе загрязняющих веществ в водные объекты и централизованные системы водоотведения поселений, городских округов организациями, осуществляющими водоотведение, и их абонентами».

В целом требуется дальнейшее совершенствование нормативно-методических документов, регламентирующих отношения, связанные с проведением дноуглубительных работ, использованием грунтов, определением границ водных объектов и т. д.

Обсуждение

В юридической литературе отмечается, что готовится законопроект «Об экологическом оздоровлении реки Волги и её притоков, о восстановлении и сохранении природных комплексов Волжского бассейна». Недостатки обсуждаемого законопроекта кроются в его краткости и отсылочном характере. Авторы проекта не выработали в нём достаточной юридической «начинки», чтобы считать законопроект «достаточно подготовленным» [22].

Примером решения подобных проблем может быть, например, принятие Агентством по охране окружающей среды США плана, предусматривающего проведение исследования причин загрязнения вод в штате Калифорния, обнаруженных, несмотря на произведённые очистные работы [23]. Одним из приоритетных направлений деятельности контролирующих органов Агентства по охране окружающей среды США и штатов является неуклонное уменьшение количества сбрасываемых в водотоки и водоёмы неочищенных сточных вод [24]. А в соответствии с Законом о чистоте воды штаты обязаны разрабатывать утверждаемые Агентством по охране окружающей среды планы уменьшения

загрязнённых водных объектов, не отвечающих показателям качества воды, закреплённым стандартами, в том числе нормативами допустимого общего количества загрязняющих веществ, ежедневно сбрасываемых всеми источниками загрязнения в конкретный водный объект [25].

В Директиве № 2000/60/ЕС Европейского парламента и Совета Европейского Союза «Об установлении рамочных положений для деятельности Сообщества в области водной политики» в ст. 16 сформулирован интегративный подход к регулированию отношений в сфере охраны и управления водными ресурсами. В частности, закреплено, что «необходима дальнейшая интеграция в области защиты и устойчивого управления водными ресурсами в других областях политики Сообщества, таких как энергетика, транспорт, сельское хозяйство, рыболовство, региональная политика и туризм» [26]. В ЕС в 1950–1990-х гг. столкнулись с проблемами загрязнения реки Рейн, омывающей берега 6 независимых европейских государств; решение проблемы было достигнуто благодаря созданию Международной комиссии для принятия мер по восстановлению реки Рейн на протяжении многих лет, начиная с 1950-х годов [27].

Заключение

Анализ современного экологического состояния Волжского бассейна не выявляет заметного улучшения, несмотря на значительное число нормативных правовых актов, содержащих организационные и правовые меры, направленные на улучшение экологического состояния Волги. Одной из причин этого является, по-видимому, отсутствие системного подхода к решению экологических проблем бассейна Волги в целом с учётом, безусловно, и региональных аспектов, на основе комплексных правовых средств воздействия на общественные отношения в сфере обеспечения оздоровления и сохранения реки Волги. Необходимость комплексного подхода к решению проблем сохранения и оздоровления Волги обусловлена тем, что в этой сфере правового регулирования пересекаются отношения, регулируемые нормами разных отраслей законодательства: природоохранного, водного, а также законодательства в сфере водоснабжения и водоотведения, в сфере обеспечения санитарно-эпидемиологического благополучия и др. Поэтому целесообразно было бы объединить нормы, регулирующие поряд-

док установления нормативов и осуществления сброса в реку сточных и иных вод, подлежащих очистке, порядок ликвидации накопленного экологического вреда, порядок организации и осуществления государственного мониторинга за состоянием Волги, в том числе в части организации и проведения наблюдений за содержанием загрязняющих веществ в донных отложениях Волги, порядок привлечения к ответственности за причинение вреда Волге и другие положения в одном нормативном правовом акте.

В связи с этим большое значение имеет работа [28], в которой обоснованы подготовка и принятие федерального закона «Об охране реки Волги» (аналогично федеральному закону 1999 г. «Об охране озера Байкал») для комплексного и системного закрепления мер, направленных на обеспечение экологического оздоровления и на сохранение уникальной водной системы реки Волги.

Требуется также особое законодательное закрепление отношения к воде как к незаменимому природному ресурсу, принятие более серьёзных мер по недопущению деятельности, сопровождаемой истощением водных ресурсов и загрязнением пресных вод. В связи с этим необходимо дальнейшее совершенствование нормативного правового регулирования, как в целом водных отношений, так и непосредственно отношений в сфере обеспечения сохранения и предотвращения загрязнения реки Волги в Российской Федерации.

References

1. Avakian A.B. *Volga in the past, present and future*. Moskva: Ecopress-ZMR, 1998. 31 p. (in Russian).
2. Latypova V.Z., Nikitin O.V., Stepanova N.Yu., Shakirova F.M., Mukhametshin F.F. Analysis of the main processes that most threaten the ecological state of the Volga reservoirs // *Chemistry and engineering ecology: Proceedings of the XVIII International scientific conference (school of young scientists)*. Kazan, 2018. P. 174–177 (in Russian).
3. Kleymenova T.N., Shevyakov D.V. Causes of pollution of the Volga River in the Astrakhan region // *Environmental problems of natural and urban areas: Proceedings of the IX International scientific-practical conference*. Astrakhan: Astrakhan state University, 2018. P. 11–14 (in Russian).
4. Bankurova R.U. Analysis of the ecological condition of the Volga River basin: problems of use and optimization // *Vestnik sovremennykh issledovaniy*. 2018. No. 12.14 (27). P. 61–64 (in Russian).

5. Order of the government of the Russian Federation of January 26, 2016 No. 80-p Strategy development of housing and communal services in the Russian Federation for the period up to 2020 // Assembly of legislation of the Russian Federation. 01.02.2016. No. 5. Article 758. (in Russian).

6. Timofeev L.A. On the problems of legal support of the priority project "Preservation and prevention of pollution of the Volga River" // Vestnik Saratovskoy gosudarstvennoy yuridicheskoy akademii. 2018. No. 3. P. 180–189 (in Russian).

7. Order of the Government of the Russian Federation of 27.08.2009 No. 1235-p (edition of 17.04.2012) "About the approval of Water strategy of the Russian Federation for the period till 2020" // Russian Federation legislation Collection. 07.09.2009. No. 36. Article 4362. (in Russian).

8. "Passport of the priority project "Preservation and prevention of pollution of the Volga River" (app. Presidium of the presidential Council for strategic development and priority projects, minutes of 30.08.2017 No. 9) // ATP Consultant (in Russian).

9. Message of the President of the Russian Federation to the Federal Assembly dated 01.12.2016 "Message of the President of the Russian Federation to the Federal Assembly" // Parliamentary newspaper. No. 45.02-08.12.2016. (in Russian).

10. Order of the Government of the Russian Federation of 28.07.2011 N 1316-p "About the approval of the Concept of the Federal target program "Development of a water economic complex of the Russian Federation in 2012–2020" // Russian Federation legislation Collection. 08.08.2011. No. 32. Article 4854. (in Russian).

11. Water code of the Russian Federation of June 3, 2006 No. 74-FZ (VC RF) // Collection of legislation of the Russian Federation. 05.06.2006. No. 23. Article 2381. (in Russian).

12. The decree of the President of the Russian Federation from 07.05.2018 No. 204 (ed. by 19.07.2018) "On the national goals and strategic objectives development of the Russian Federation for the period up to 2024" // Collected legislation of the Russian Federation. 14.05.2018. No. 20. Article 2817. (in Russian).

13. Federal law of 29.11.2018. No. 459-FZ "On the Federal budget for 2019 and for the planning period 2020 and 2021" // Assembly of legislation of the Russian Federation of December 3, 2018. No. 49 (part II, III, IV, V, VI). Article 7531. (in Russian).

14. Order No. 141 of the Ministry of natural resources of the Russian Federation of 01.06.2012 (ed. of 18.05.2018) "On approval of the rules for granting subsidies from the Federal budget to Federal state budgetary institutions administered by the Ministry of natural resources and ecology of the Russian Federation for other purposes" // Rossiyskaya Gazeta. No. 156. 11.07.2012. (in Russian).

15. Order of Ministry of transport of Russia from 19.01.2018 No. 19 "About approval of Rules of navigation of vessels on inland waterways" (Registered in Ministry of justice of Russia 07.03.2018 No. 50283) approved the Rules for navigation of vessels on inland waterways (including the Volga River) // ATP ConsultantPlus (in Russian).

16. The decision of KM RT from 30.12.2004 No. 589 (ed. by 03.04.2017) "On the procedure of charging for the discharge of wastewater and pollutants into Sewerage system of organizations of water and sewage utilities" // ATP ConsultantPlus (in Russian).

17. The decision of the Executive Committee of the municipal formation of "Zelenodolsky municipal district" from 22.12.2017 No. 03-03-3242 "According to the norms of permissible concentrations of pollutants" (along with "Norms of permissible concentrations of pollutants in wastewater of subscribers that are installed to prevent negative impacts on the water body (the Volga River)") // The official portal of legal information of the Republic of Tatarstan [Internet resource] <http://pravo.tatarstan.ru> (Accessed: 26.12.2017) (in Russian).

18. The message of the President of the Russian Federation to the Federal Assembly on 01.03.2018 "Presidential address to the Federal Assembly" // Rossiyskaya Gazeta. No. 46. 02.03.2018. (in Russian).

19. GOST R 54003-2010. National standard of the Russian Federation. Environmental management. Assessment of past environmental damage accumulated at the locations of organizations. General provisions (app. and put into effect by the Order of rostekhregulirovaniya of 30.11.2010 No. 594-st). Moskva: Standartinform, 2011. 19 p. (in Russian).

20. RD 52.24.620-2000. Guidance document. Methodical instructions. Nature protection. Hydrosphere. The organization and functioning of the subsystem of monitoring of the anthropogenic eutrophication of freshwater ecosystems (approved. and put into effect by Roshydromet 22.11.2000) // ATP ConsultantPlus (in Russian).

21. Federal law of 29.07.2017 No. 225-FZ (ed. of 03.08.2018) "On amendments to the Federal law "On water supply and sanitation" and certain legislative acts of the Russian Federation" // Collection of legislation of the Russian Federation. 31.07.2017. No. 31 (Part I). Article 4774. (in Russian).

22. Sivakov D.O. Water law: Educational and practical guide. Moskva: Yustitsinform, 2007. 264 p. (in Russian).

23. Dearen J. EPA mystified by stubborn DDT Pollution in SF Bay // Santa Monica Daily Press. 2012. March 19. P. 5.

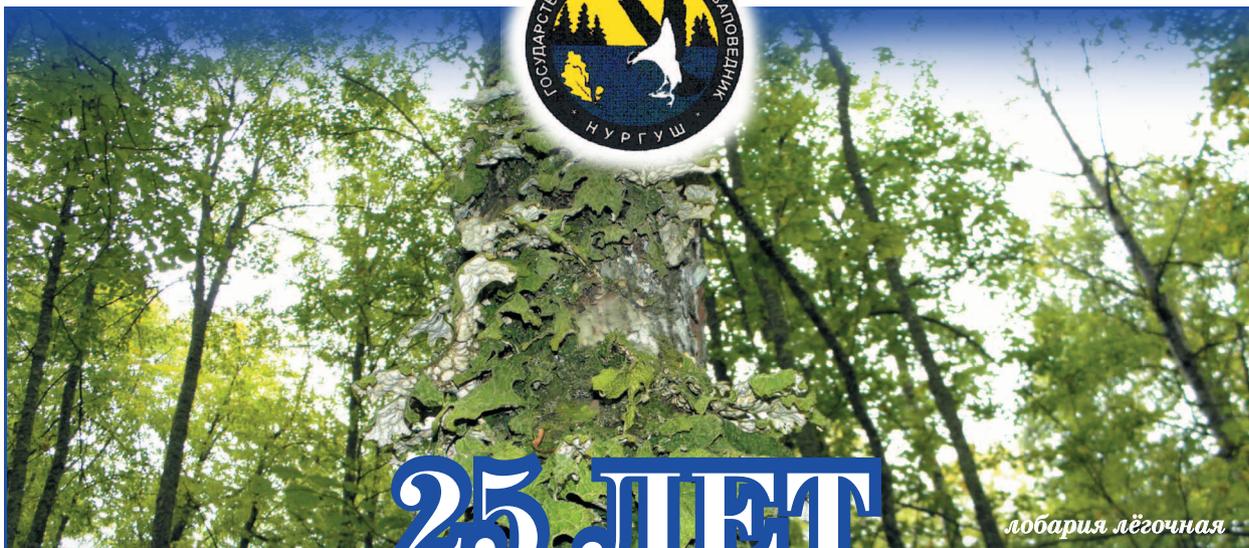
24. Egendorf L.K. The Environment. Opposing Viewpoints Series. Thomson Gale, 2005. P. 81.

25. Daily Press Staff. EPA, L.A. Water Board approve pollution plans // Santa Monica Daily Press. 2012. March 28. P. 1, 12.

26. Directive No. 2000/60/EC of the European parliament and of the council establishing a framework for community action in the field of water policy // Official Journal of the European Union N L327. 22.12.2000. P. 1 [Internet resource] <http://eur-lex.europa.eu/> (Accessed: 26.12.2017)

27. Malle K.-G. Cleaning up the river Rhine // Scientific American Inc. 1996. No. 1. P. 70–75.

28. Rozenberg G.S., Gelashvili D.B., Zibarev A.G., Kulagin A.Yu., Latypova V.Z., Saksonov S.V., Salieva R.N., Usmanov I.Yu., Khasaev G.R., Shlyakhtin G.V. Some thoughts on the Federal law on the Volga River // Samarskaya Luka: problems of regional and global ecology. 2019. V. 28. No. 1. P. 9–17 (in Russian).



25 ЛЕТ

лобария лёгочная

ГОСУДАРСТВЕННОМУ ПРИРОДНОМУ ЗАПОВЕДНИКУ «НУРГУШ»



кулик-сорока



орлан-белохвост



надбородник безлистный



венерин башмачок настоящий

Краснокнижные виды растений и животных заповедника «Нургуш»

Индекс 82027, 48482



ISSN 1995-4301



9 771995 430004