



2018

*Теоретическая
и прикладная*

ЭКОЛОГИЯ

ISSN 1995-4301

№ 1



**ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ
ПРОБЛЕМЫ
ЭКОЛОГИИ**

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

**МОНИТОРИНГ
АНТРОПОГЕННО
НАРУШЕННЫХ
ТЕРРИТОРИЙ**

**ЭКОЛОГИЗАЦИЯ
ПРОИЗВОДСТВА**

ЭКОТОКСИКОЛОГИЯ

**СОЦИАЛЬНАЯ
ЭКОЛОГИЯ**

**ПОПУЛЯЦИОННАЯ
ЭКОЛОГИЯ**

**ХРОНИКА
СОБЫТИЙ
И МЕРОПРИЯТИЙ**

ОБЩЕСТВЕННО-НАУЧНЫЙ ЖУРНАЛ

Опорный государственный классический университет на Вятке



Ректор ФГБОУ ВО «ВятГУ» В. Н. Пугач

■ Миссия университета – содействие опережающему развитию Кировской области путём формирования региональной интеллектуальной элиты, научно-инновационной и предпринимательской среды.

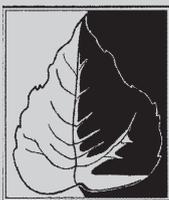
■ Стратегическая цель опорного университета – формирование исследовательского и предпринимательского регионально-го университета, ориентированного на достижение позиции национального лидера в области «наук о жизни».



Стратегические задачи опорного университета:

1. Создание инфраструктуры генерации знаний.
2. Модернизация образовательной деятельности университета в интересах реального сектора экономики и социальной сферы.
3. Формирование предпринимательских компетенций в университетской среде.
4. Повышение узнаваемости и интеграции университета в международное научно-образовательное сообщество.
5. Развитие центра превосходства «Фармацевтическая биотехнология» и междисциплинарных центров компетенций в областях: промышленный и бизнес-инжиниринг; полимерные материалы; экологические технологии и системы; биологические ресурсы.
6. Развитие социокультурной среды региона.

Развитие университета тесно связано с развитием региональной промышленности, что и обусловило выбор в качестве приоритетных направлений развития университета биотехнологии и химические технологии, педагогические науки, биоинформатику и IT-технологии, науки об обществе.



**Теоретическая
и прикладная
ЭКОЛОГИЯ**
№ 1, 2018
<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

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

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

Учредители журнала: ООО Издательский дом «Камертон», ФГБОУ ВО «Вятский государственный университет» и ФГБУН Институт биологии Коми НЦ УрО РАН.

Главный редактор Т.Я. Ашихмина, д.т.н., профессор, зав. кафедрой 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., директор Института 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

По вопросам публикации статей обращаться: 610000, г. Киров, ул. Московская, 36. Тел. (8332) 37-02-77. E-mail: envjournal2017@gmail.com

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

Издание зарегистрировано Федеральной службой по надзору в сфере связи, информационных технологий и массовых коммуникаций. Свидетельство о регистрации ПФ № ФС 77-29059. Подписные индексы 82027, 48482 в каталоге Агентства «Роспечать».

Зарубежная подписка оформляется через фирмы-партнёры ЗАО «МК-ПЕРИОДИКА» по адресу: 129110, г. Москва, ул. Гиляровского, 39, Тел.: (495) 281-91-37, 281-97-63. E-mail: info@periodicals.ru; <http://www.periodicals.ru>

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

Подписано в печать 20.03.2018. Тираж 1150 экз. Заказ № 342.

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
- В.В. Гутенёв** д.т.н., профессор, первый зам. председателя Комитета Государственной Думы РФ по промышленнос
- М.В. Дородников** к. с.-х. н., научный сотрудник Университета Гёттингена им. Георга Августа (Германия)
- И.Е. Дубовик** д.б.н., профессор Башкирского государственного университета
- Г.П. Дудин** д.б.н., профессор, зав. кафедрой Вятской государственной сельскохозяйственной академии
- Г.А. Евдокимова** д.б.н., профессор, заместитель директора Института проблем промышленной экологии Севера Кольского НЦ РАН
- Г.М. Зенова** д.б.н., профессор Московского государственного университета им. М.В. Ломоносова
- Г.Я. Кантор** к.т.н., научный сотрудник Института биологии Коми НЦ УрО РАН
- В.Л. Коваленко** к.т.н., доцент Украинского государственного химико-технологического университета
- Е.Ю. Колбовский** д.г.н., профессор, ведущий научный сотрудник Московского государственного университета им. М.В. Ломоносова
- Э.И. Коломиец** д.б.н., академик НАН Беларуси, директор Института микробиологии НАН Беларуси
- Л.В. Кондакова** д.б.н., профессор Вятского государственного университета
- В.А. Коток** к.т.н., доцент Украинского государственного химико-технологического университета
- А.В. Кучин** д.х.н., член-корр. РАН, профессор, зав. отделом и зав. лабораторией Института химии Коми НЦ УрО РАН
- В.Н. Лаженцев** д.г.н., академик РАН, профессор, советник РАН
- В.З. Латыпова** д.х.н., член-корр. Академии наук Республики Татарстан, профессор Казанского федерального университета
- Ли Юй** профессор, директор Института микологии 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
- Н.В. Мищенко** д.б.н., доцент Владимирского государственного университета имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых
- 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
- 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.И. Холстов** д.х.н., руководитель центра аналитических исследований по Конвенциям о запрещении химического оружия ФГУП «ГосНИИОХТ»
- Т.А. Трифонова** д.б.н., профессор Московского государственного университета им. М.В. Ломоносова
- М.Х. Хусейн** д.б.н., профессор Университета Ассиут (Египет)



*Theoretical
and applied*
ECOLOGY
№ 1, 2018

The journal is included in the list of the leading peer-reviewed journals and issues for publishing the main results of research for PhD and doctoral dissertations

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

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

The founders of the journal: Publishing house "Kamerton", Vyatka State University, Institute of Biology of Komi Science Centre of the Ural Division RAS

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 Division 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, Director of Institute of Biology of the Komi Science Centre of the Ural Division RAS

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

Doctor in Biology, Federal agricultural research center of North-East named after 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 Division 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: envjournal2017@gmail.com

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

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

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

Address: 39 Gilyarovskiy St., Moscow, Russia, 129110.
Tel: (495) 281-91-37, 281-97-63, Fax: (495) 281-37-98

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

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

Designer – Tatiana Korshunova. Cover photo – Aleksandr Shirokikh. Translation – Grigoriy Kantor.

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 Division RAS
- V.V. Gutenev** Doctor in Technical Sciences, Professor, First Deputy Chairman of the State Duma Committee on Industry
- M.V. Dorodnikov** PhD in Agricultural Sciences, Georg August University of Göttingen (Germany)
- I.E. Dubovik** Doctor in Biology, Professor of Bashkir State University
- G.P. Dudin** Doctor in Biology, Professor of Vyatka State Agricultural Academy
- G.A. Evdokimova** Doctor in Biology, Professor, Vice-Director of Research Institute of the North Industrial Ecology, Kola SC of RAS
- G.M. Zenova** Doctor in Biology, Professor of Lomonosov Moscow State University
- G.Ya. Kantor** PhD in Technical Sciences, researcher of the Institute of Biology of the Komi Science Centre of the Ural Division 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 Division of RAS
- V.N. Lazhentsev** Doctor in Geography, Professor, RAS Advisor
- V.Z. Latypova** Doctor in Agriculture, corresponding member of Tatarstan Academy of Sciences, Professor of Kazan Federal University
- Li Yu** Professor, Director of Mycology Institute of Jilin Agricultural University, Foreign Associate of RAS (China)
- S.G. Litvinets** PhD in Agricultural Sciences, Vice-Rector for Science and Innovation of Vyatka State University
- V.A. Malinnikov** Doctor in Technical Sciences, Professor of Moscow State University of Geodesy and Cartography
- N.V. Mishchenko** Doctor in Biology, Associate Professor of Vladimir State University named after Alexander and Nikolay Stoletovs
- 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 Division RAS
- S.V. Pestov** PhD in Biology, Associate Professor of Vyatka State University
- S.A. Rubtsova** Doctor in Chemistry, Director of the Institute of Chemistry the Komi Science Centre of the Ural Division 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 after N.V. Rudnitsky
- T.A. Trifonova** Doctor in Biology, Professor of Lomonosov Moscow State University
- V.I. Kholstov** Doctor in Chemistry, Professor, Head of the Center for Analytical Studies on the Conventions on the Prohibition of Chemical Weapons of the Federal State Unitary Enterprise "State Scientific Research Institute of Organic Chemistry and Technology"
- M.Kh. Hussein** Doctor in Biology, Professor of University of Assiut University (Egypt)

СОДЕРЖАНИЕ

ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ПРОБЛЕМЫ ЭКОЛОГИИ

Л. И. Домрачева, В. С. Симакова Реакции про- и эукариотных микроорганизмов на действие синтетических поверхностно-активных веществ (обзор) 5

МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ. МОДЕЛИ И ПРОГНОЗЫ

Т. А. Адамович, Г. Я. Кантор, Т. Я. Ашихмина, В. П. Савиных Анализ сезонной и многолетней динамики вегетационного индекса NDVI на территории государственного природного заповедника «Нургуш» 18

А. А. Калинина, А. С. Македошин, Н. В. Гурский, Т. Н. Соколова, В. Ф. Смирнов Кинетическое исследование восстановления иоднитротетразолия хлорида суспензией в физиологическом растворе рамотрицательных бактерий *Pseudomonas aeruginosa* и *Escherichia coli* 25

А. В. Ялалетдинова, Л. В. Еникеева, М. Ю. Воздаева, Е. А. Кантор Статистические характеристики взаимосвязи мутности и расходов воды в реке, вызванных попусками водохранилища 33

МОНИТОРИНГ АНТРОПОГЕННО НАРУШЕННЫХ ТЕРРИТОРИЙ

Е. А. Мамонтова, Е. Н. Тарасова, А. А. Мамонтов, Е. В. Иванов Влияние растительного покрова и содержания органического вещества на накопление хлорорганических соединений в почвах 43

Д. Б. Петренко, Н. В. Корсакова, Н. В. Васильев Накопление фторсодержащих соединений в почвах придорожных территорий Московской области 52

В. С. Артамонова, С. Б. Бортникова О развитии *Azotobacter chroococcum* Beijerinck в старовозрастных отвалах антрацита 60

ПОПУЛЯЦИОННАЯ ЭКОЛОГИЯ

Е. Е. Кулюгина Особенности состава и структуры сообществ с участием *Acomastylis glacialis* на границе ареала (Приполярный Урал) 73

И. Г. Широких, Я. И. Назарова, А. А. Широких, Т. Я. Ашихмина Сообщества актиномицетов в бурозёмах лесных экосистем с различным типом климата 80

А. Г. Татаринов, О. И. Кулакова Многолетние изменения структуры населения дневных чешуекрылых (Lepidoptera, Rhopalocera) разнотравного луга 88

РЕЦЕНЗИИ

Л. И. Домрачева Т. Я. Ашихмина. Учёный. Химик-эколог. Педагог. Общественный деятель. О книге из серии «Почётные граждане города Кирова» 97

ХРОНИКА

70-летие Василия Алексеевича Сысуева 100
В. Н. Пугач Интеграция образования и науки – важнейший фактор развития опорного классического университета 101

CONTENTS

THEORETICAL PROBLEMS OF ECOLOGY

- L. I. Domracheva, V. S. Simakova* Reactions of pro- and eukaryotic microorganisms to the action of synthetic surfactants (review)5

METHODOLOGY AND RESEARCH METHODS. MODELS AND FORECASTS

- T. A. Adamovich, G. Ya. Kantor, T. Ya. Ashikhmina, V. P. Savinykh* The analysis of seasonal and long-term dynamics of the vegetative NDVI index in the territory of the State Nature Reserve "Nurgush"18
- A. A. Kalinina, A. S. Makedoshin, N. V. Gurskiy, T. N. Sokolova, V. F. Smirnov* Kinetic study of the reduction of iodinitrotetrazolium chloride by suspension of gram-negative bacteria *Pseudomonas aeruginosa* and *Escherichia coli* in a physiological solution25
- A. V. Yalaletdinova, L. V. Enikeeva, M. Yu. Vozhdayeva, E. A. Kantor* Statistical characteristics of relationships between turbidity and water flow rate caused by releases of the water reservoir33

MONITORING OF ANTHROPO- GENICALLY DISTURBED AREAS

- E. A. Mamontova, E. N. Tarasova, A. A. Mamontov, E. V. Ivanov* The influence of vegetation cover and the content of organic matter on the accumulation of organochlorine compounds in soils43
- D. B. Petrenko, N. V. Korsakova, N. V. Vasiliev* Accumulation of fluorine-containing compounds in soils of roadside territories in the Moscow Region52
- V. S. Artamonova, S. B. Bortnikova* About the development of *Azotobacter chroococcum* Beijerinck in old age dumps of anthracite60

POPULATION ECOLOGY

- E. E. Kulyugina* Features of the composition and structure of communities with *Acomastylis glacialis* in the area border (Subpolar Urals)73
- I. G. Shirokikh, Ya. I. Nazarova, A. A. Shirokikh, T. Ya. Ashikhmina* Communities of actinomycetes in brown soils of forest ecosystems with different climate80
- A. G. Tatarinov, O. I. Kulakova* Longterm changes in the structure of the Butterflies population (Lepidoptera, Rhopalocera) on the mixed grass meadow88

REVIEWS

- L. I. Domracheva* T. Ya. Ashikhmina. Scientist. Chemist-ecologist. The teacher. Public figure. About the book from the series "Honorary Citizens of the City of Kirov"97

CHRONICLE

- 70th anniversary of Vasiliy Alexeyevich Sysuev100
- V. N. Pugach* Integration of education and science is the most important factor in the development of the basic classical university101

Реакции про- и эукариотных микроорганизмов на действие синтетических поверхностно-активных веществ (обзор)

© 2018. Л. И. Домрачева^{1,2}, д. б. н., профессор, В. С. Симакова¹, аспирант,

¹Вятская государственная сельскохозяйственная академия,
610017, Россия, г. Киров, Октябрьский проспект, 133,

²Институт биологии Коми научного центра Уральского отделения РАН,
167982, Россия, Республика Коми, г. Сыктывкар, ул. Коммунистическая, 28,
e-mail: dli-alga@mail.ru

Анализ литературных данных показывает, что такие поллютанты, как синтетические поверхностно-активные вещества (СПАВ), могут оказывать очень сильное действие на развитие микроорганизмов различной систематической принадлежности: бактерии, водоросли и грибы. СПАВ могут и стимулировать, и ингибировать метаболические процессы в клетках: фотосинтез у водорослей и цианобактерий, ферментативную активность всех групп изучаемых микроорганизмов. СПАВ вызывают нарушение проницаемости цитоплазматических мембран, которое полностью изменяет поток питательных веществ в клетки и выход из них экзометаболитов.

Попадание СПАВ в почву приводит к изменению численности, видового состава и структуры микробных комплексов, что становится причиной нарушения природных циклов элементов, в частности, азота, связанного с перераспределением доли аммонификаторов, нитрификаторов, денитрификаторов и азотфиксаторов в микробиоценозах.

Ключевые слова: синтетические поверхностно-активные вещества (СПАВ), бактерии, цианобактерии, водоросли, дрожжи, микромицеты, токсичность.

Reactions of pro-and eukaryotic microorganisms to the action of synthetic surfactants (review)

L. I. Domracheva^{1,2}, V. S. Simakova¹,

¹Vyatka State Agricultural Academy,
133 Oktyabrskiy Prospect, Kirov, Russia, 610017,

²Institute of Biology of the Komi Science Centre of the Ural Division RAS,
28 Kommunisticheskaya St., Syktyvkar, Russia, 167982,
e-mail: dli-alga@mail.ru

The analysis of scientific publications shows that such pollutants as synthetic surfactants, brought into the environment with technogenic and domestic pollution, can have a very strong effect on the development of microorganisms of different systematic groups: bacteria, algae and fungi. The diversity of water and soil microflora and the diversity of pollutants do not allow the creation of a solid concept of the evolution of microbial communities under the influence of synthetic surfactants, since these compounds can both stimulate and inhibit microbiological processes. In particular, during studies on pure cultures of microorganisms associated with the study of the role of synthetic surfactants in the change in the physiological processes taking place in microbial cells, it was shown that synthetic surfactants cause a strong violation of the permeability of cytoplasmic membranes, which completely disturbs the flow of nutrients into the cells and the escape of exometabolites from them. The surfactants also affect metabolic processes such as photosynthesis in algae and cyanobacteria, the enzymatic activity of all groups of microorganisms studied.

The penetration of synthetic surfactants into the soil leads to radical reorganization of microbial complexes, changing the contribution of different physiological groups of microorganisms to their structure. In particular, violations of the nitrogen cycle are associated with changes in the number of ammonifiers, nitrifiers, denitrifiers and nitrogen fixers.

At the same time some microorganisms strains resistant to various surfactants are isolated, which in the future can be used for bioremediation of ecosystems contaminated with these pollutants.

Keywords: synthetic surfactants, bacteria, cyanobacteria, algae, yeast, micromycetes, toxicity.

Синтетические поверхностно-активные вещества (СПАВ) представляют собой разнородную по химической структуре группу соединений, которые обладают одинаковой способностью снижать поверхностное натяжение жидкостей. Традиционно все СПАВ принято делить на 4 группы: ионогенные – анионные (АСПАВ) и катионные (КСПАВ) (диссоциирующие на ионы в водной среде); неионные (НСПАВ) (недиссоциирующие) и амфотерные (диссоциирующие как анионные или как катионные в зависимости от реакции среды). Общий объём производства СПАВ составляет более 20 млн т в год. Количество марок предлагаемых на рынке СПАВ, которые продаются под разными наименованиями, варьирует, по различным источникам, от 700 до 6000 [1–3]. Целевое назначение СПАВ как моющих средств обуславливает попадание почти всего объёма их мировой продукции в сточную воду, которая, в свою очередь, может загрязнять поверхностные водоёмы, грунтовые воды, почву [4]. В настоящее время 95–98% СПАВ от общего количества применяемых детергентов – синтетические моющие средства (СМС), содержащие в своей основе 20–40% СПАВ и различные добавки, повышающие моющую способность средства [5–9]. СПАВ могут усиливать токсичность ряда ксенобиотиков (пестицидов, красителей, лекарственных веществ) [10, 11].

В почву СПАВ попадают различными путями. Источником загрязнения могут служить технологические процессы, связанные с их получением, хранением, транспортировкой. СПАВ входят в состав пестицидов, они использовались при проведении дезактивационных мероприятий во время ликвидации аварии на Чернобыльской АЭС [12–14]. Увеличение парка автомобилей привело к увеличению числа автомоек, использующих СПАВ для мытья автомобилей [15]. Поступление СПАВ в окружающую среду (ОС) продолжает ежегодно нарастать приблизительно на 2–5% [16].

В почвенных экосистемах СПАВ влияют, в первую очередь, на состояние микробиоты. Характер изменений в составе и функционировании микробценозов фиксируется гораздо быстрее, чем в фитоценозах, благодаря высокой скорости размножения микроорганизмов (МО). Поэтому в последние годы при оценке состояния ОС и нормировании её качества становится доминирующим экологический подход с использованием МО [17, 18].

Цель данного обзора – рассмотрение ответных реакций бактерий, водорослей и

микровицетов на действие СПАВ различной химической природы.

Влияние СПАВ на бактерии. Бактерии и бактериальные комплексы на действие СПАВ реагируют по-разному. Чаще всего первичные реакции связаны с изменением численности и темпов размножения бактерий. Так, наблюдалось возрастание численности аммонифицирующих бактерий в ризосфере пшеницы по сравнению с контролем от 2-х до 4,8 раз в зависимости от фазы развития растения при внесении НСПАВ неонала АФ-14 в серую лесную тяжелосуглинистую почву в дозах 2 и 10 г/см² [19]. При этом максимум развития аммонификаторов наблюдался в фазу цветения пшеницы, что авторы связывают с усиленным выделением корневых экзометаболитов в этот период.

СПАВ избирательно действуют на бактерии. Внесение в почву АСПАВ алкилбензолсульфоната натрия (АБС) оказало стимулирующее действие на аэробные нитрифицирующие бактерии и на анаэробные клостридии [20]. НСПАВ диталан в концентрации 100 мкг/мл и сульфенол в концентрации 200 мкг/мл при внесении в чернозём и тёмно-каштановую почву оказывали токсическое действие на МО, вызвав уменьшение их общего количества по сравнению с контролем на 2–4 порядка [21]. Особенно чувствительными к действию СПАВ оказались актиномицеты. Добавление АБС в природную воду в концентрациях 2, 20 и 100 мг/л приводило к увеличению численности бактерий, степени их агрегированности и деструкции АБС [22]. Полученные данные явно свидетельствуют о стимуляции генеративной и метаболической функций бактерий этим препаратом.

Концентрации додецилсульфата натрия (ДСН) и СМС Лотос от 50 до 1000 мг/кг вызывали снижение численности целлюлозоразрушающих бактерий в почве [23]. Высокую чувствительность к действию автошампуня Uni проявили бактерии-азотфиксаторы, снизив на порядок свою численность при концентрации препарата, соответствующей 4 рекомендуемым дозам (р. д.) [24].

Изменяя количественные соотношения физиологических групп МО, СПАВ могут привести к нарушению круговорота веществ в экосистемах. Так, на фоне разных концентраций сульфенола (0,1; 0,3; 1,0 г/кг почвы) показано, что низкие концентрации препарата активизировали азотфиксацию, высокие – тормозили этот процесс [25]. Нитрификация подавлялась при всех испытываемых дозах

сульфонола. Процесс аммонификации активизировался тем больше, чем выше была концентрация препарата, видимо, благодаря тому, что некоторые виды аммонификаторов являются деструкторами СПАВ, что способствует накоплению аммонийной формы азота, снижению нитратной, уменьшению денитрификационных потерь азота. В то же время подавление азотфиксаторов ведёт к снижению доли «биологического» азота в почве [25]. Однако существуют и противоположные данные, свидетельствующие о том, что некоторые СПАВ способны стимулировать рост клеток и активность азотфиксации популяцией *Azotobacter chroococcum* [26].

СПАВ могут оказывать влияние на метаболические процессы в клетках МО. Например, подавление дыхательной активности обнаружено при добавлении натриевой соли бензол-1,2-дикарбоновой кислоты к клеткам бактериального штамма *Gluconobacter oxydans* 9.4 [27].

Обнаружен разный уровень протеолитической активности двух наиболее распространённых почвенных бактерий: *Bacillus mesentericus* и *Serratia marcescens* при действии НСПАВ неонала АФ-14 [28]. Так, у *B. mesentericus* происходило заметное увеличение биомассы и протеазной активности при добавлении в среду СПАВ в концентрациях от 0,0001 до 100 мг/л; у *S. marcescens* увеличивалась протеазная активность, но величина микробной биомассы сохранялась на уровне контроля.

Существуют данные о том, что под влиянием СПАВ из клеток МО в ОС выделяются низкомолекулярные метаболиты, а также плазмиды [29]. Опасность СПАВ проявляется и в способности вызывать мутации у ряда бактерий [30]. Доказано наличие прямой корреляции между мутагенной активностью некоторых СПАВ и их способностью индуцировать профаги из лизогенных бактерий [31].

СПАВ, в частности тритон X-100, способен вызывать структурные перестройки в липидах бактериальных мембран, которые приводят к отрыву от мембран крупных фрагментов, содержащих окислительно-восстановительные ферменты, тем самым ингибируя перенос электронов в дыхательной цепи. Это свойство детергентов широко используется для лизиса МО и имеет большое практическое значение, особенно для уничтожения патогенных форм [32].

Сдругой стороны, при изучении взаимозависимых связей между концентрацией растворённого кислорода, удельной скоростью роста

и дегидрогеназной активностью в присутствии СПАВ установлено, что детергенты улучшают проницаемость клеточных мембран, увеличивают аэрацию культуральной жидкости и способствуют транспорту кислорода и субстрата к клеткам растущей культуры [33, 34], повышают активность некоторых ферментов [35], изменяют проницаемость клеточных мембран [36], повышают скорость дыхания [37].

Полисахариды и белки снижают антимикробную активность ряда катионных и амфотерных СПАВ [38], активность анионных соединений усиливается при снижении pH среды [39], неионогенные вещества характеризуются более слабым антимикробным действием [40].

Среди СПАВ важное место занимают НСПАВ Twin. Деформации в клеточной стенке МО, возникающие в результате действия Twin, ведут к изменению её компонентного состава, влияют на биосинтез и активацию глюкозоизомеразы, особенно у стрептомицетов [41–44]. Другие СПАВ также могут снижать активность бактериальных ферментов. Так, после обработки клеток сальмонелл лаурилсульфатом натрия значительно понижается их дегидрогеназная активность, гликолиз, а также потребление кислорода [38]. Действие КСПАВ на стрептококки сопровождается изменением вторичной структуры белков и инактивацией их ферментных систем [45].

Считается, что «молодые» бактериальные клетки, выращенные на полноценной питательной среде, устойчивее к действию СПАВ, чем клетки в более поздней фазе роста [46].

Эксперименты, проведённые с таким СПАВ, как циперметрин, показали, что добавление в наружную среду ионов Cs^+ в концентрации $2,0 \cdot 10^{-3}$ моль/л вызывало уменьшение входящего ионного тока в бактериальных клетках, в то время, как внесение во внешнюю среду ионов Na^+ в концентрации $5,0 \cdot 10^{-5}$ моль/л приводило к заметному росту входящего ионного тока [47, 48]. Таким образом, циперметрин, возможно, способен индуцировать возникновение дефектов в липидном бислое бактериальных мембран, что проявляется в наблюдаемом росте неселективной ионной утечки.

Разрушение клеточной стенки под воздействием СПАВ зависит и от концентрации ионов магния в среде. В присутствии 70 мМ Mg^{2+} из клеток выходят только низкомолекулярные РНК и растворимые белки, а при концентрации 40 мМ 70 S субъединицы и рибосомные фрагменты выделяются вместе

с растворимым материалом. При более низких концентрациях Mg^{2+} в экстракционном растворе обнаруживаются полирибосомы, а при падении концентрации ниже 5 мМ из клеток выходит ДНК [49].

КСПАВ способны действовать на фосфолипидные компоненты мембран протопластов у бактерий, в то время, как АСПАВ воздействует на белковые компоненты мембран [50–52]. Была предложена модель действия СПАВ на мембраны, согласно которой они сорбируются на мембране, внедряясь в неё своей липофильной частью, и действует на мембранное окружение по принципу клина, при этом прочность мембраны резко падает, в результате чего она разрушается [53].

«Мягкие» СПАВ (алкилсульфаты) даже в концентрациях 500–2000 мг/л не оказывают бактерицидного и бактериостатического действия на протеолитическую микрофлору. При концентрациях 2–10 мг/л они даже стимулируют размножение бактерий. Причиной этого, очевидно, является утилизация СПАВ микрофлорой и вероятность лучшего усвоения питательных элементов из ОС вследствие изменения проницаемости мембран [54, 55].

Определяющим в механизме действия «жестких» КСПАВ (алкилдиметиламмоний хлорид) на бактерии является нарушение целостности цитоплазматической мембраны [56]. Эффект усиления действия СПАВ на граммотрицательные бактерии проявляется при их совместном действии с антибиотиками [57].

Деструкторы СПАВ встречаются чаще среди представителей родов *Pseudomonas*, *Bacillus*, *Clostridium*, *Serratia*, *Micrococcus*, *Mycobacterium*, *Flavobacterium*, *Nocardia*, способных образовывать эстеразы, расщепляющие эфирные связи с освобождением жирных кислот [58–60].

На активность ферментов МО могут влиять не сами СПАВ, а токсичные продукты их деструкции, что показано в опытах с микробным штаммом *Dietzia maris* АМЗ, внесённым в почву одновременно со СПАВ, в которых активность микробной дегидрогеназы снизилась в почве со СПАВ на 59% по сравнению с контролем только через 30 суток после начала опыта [61–64].

В ряде исследований показана повышенная устойчивость цианобактерий (ЦБ) к СПАВ по сравнению с другими бактериями. В частности, действие анионного детергента ДСН на клетки ЦБ *Anacystis nidulans* и пурпурные бактерии *Rhodobacter capsulatus* и *Rh. sphaeroides* показало, что ДСН приводил

к нарушению барьерных свойств цитоплазматической мембраны у родококков, у *A. nidulans* подобных изменений не наблюдалось [65]. Вероятно, причиной данного явления является повышенное содержание полисахаридов (до 60%) в составе липосахаридов клеточной стенки ЦБ. Именно полисахариды могут выполнять защитную функцию по отношению к токсическому действию СПАВ. При этом, чем выше плотность цианобактериальной популяции, тем слабее токсическое действие СПАВ [66]. В определённых условиях СПАВ, содержащие фосфор, могут стимулировать рост ЦБ [18].

Иные результаты получены при оценке степени токсичности некоторых НСПАВ (превоцела, неонолов, плюроники), рекомендованных для использования при нефтедобыче, в концентрациях от 0,05 до 13,00% для ЦБ *Anabaena variabilis*, *Nostoc commune* и *N. linckia*: отмечалось не только ингибирование роста колоний ЦБ, но и обесцвечивание клеток ЦБ с последующим их лизисом [12].

При изучении влияния трёх автошампуней (Концентрат, **Uni** и **Felix**) в концентрациях, применяемых для мойки автомобилей, на развитие почвенных ЦБ *N. paludosum* и *Fischerella muscicola* было показано, что происходит изменение таких показателей состояния цианобактериальных популяций, как их численность и дегидрогеназная активность [67–70]. Наибольшей токсичностью для представителей фотосинтезирующей почвенной микробиоты обладал автошампунь Uni: под его влиянием численность клеток *N. paludosum* снизилась почти в 25 раз по сравнению с контролем в дозе, рекомендуемой для мойки автомобилей. Определение дегидрогеназной активности показало, что из испытуемых автошампуней менее токсичен Концентрат (71% нежизнеспособных клеток), наиболее токсичны Uni и Felix, вызывающие гибель почти 100% клеток

Влияние СПАВ на водоросли. Влияние СПАВ на водоросли проявляется в изменении их видового состава, снижении разнообразия, уменьшении численности клеток, что, возможно, связано с ингибированием потребления питательных веществ водорослями, подавлением синтеза белка и повреждением ДНК, приводящем в результате к патоморфологическим нарушениям [73–76]. Например, в ценобиях зелёной водоросли *Scenedesmus quadricauda* при действии различных концентраций АБС появились клетки как бы лишённые содержимого (тенивые клетки). При всех

испытуемых концентрациях АБС вызывал заметное снижение количества белков и ДНК [77]. Усиление токсичности АБС для одноклеточной зелёной водоросли *Chlamydomonas variabilis* наблюдалось пропорционально удлинению алканной цепи от 10 до 19 атомов углерода [78]. Для другой зелёной водоросли *Ch. reinhardii* установлено, что по мере увеличения атомов углерода в алкильной цепи анионных, неионных и амфотерных СПАВ токсический эффект слабеет и усиливается по мере повышения гидрофильности испытуемых веществ [79].

Сравнительная оценка действия анионного и катионного детергентов на рост *Platymonas viridis* показала, что катионный детергент тетрадецилметаммоний бромид вызывал угнетение роста уже в концентрации 0,25 мг/л. Анионный детергент ДСН в этой концентрации влияния на развитие водорослевой культуры не оказывал. Предполагается, что ингибирование роста водорослей под влиянием КСПАВ является следствием ряда нарушений их структур и метаболизма, в частности, пигментного комплекса водорослей и его фотосинтетической активности. При этом КСПАВ для водорослей являются более токсичными, чем АСПАВ [80, 81].

В экспериментах с аксеничными культурами водорослей, не имеющих бактерий-спутников, было выявлено, что АСПАВ ДСН ингибирует рост культуры водорослей р. *Chlorella* на жидкой питательной среде при меньших концентрациях, чем на плотных средах [82]. Действие КСПАВ тетрадецилтриметиламмоний бромида и цетилтриметиламмоний бромида на *Sc. quadricauda* проявилось в полном угнетении её роста уже при концентрациях 0,5–0,6 мг/л [83]. Исследование токсичности такого катионного детергента, как катамин, для двух видов р. *Chlorella* и двух видов р. *Scenedesmus* показало, что максимальной резистентностью отличались виды р. *Scenedesmus* по сравнению с видами р. *Chlorella* [84]. В другом исследовании влияния неионных, катионных и анионных СПАВ на почвенные водоросли установили, что невысокие концентрации СПАВ (0,2–2,0 мг/г) увеличивали общую численность и биомассу водорослей, в то время, как видовое разнообразие оставалось на уровне контроля [85]. При высоких концентрациях (7,0–80,0 мг/г) эти показатели снижались и почвенные водоросли погибали. Наиболее резистентными оказались виды из порядков *Chlorococcales* и *Chlamydomonadales*. При содержании в среде СПАВ

в количестве 40,0–80,0 мг/г обнаружались только мелкие хламидомонады *Ch. minima* и *Ch. minutissima* и деформированные, не пригодные для идентификации, клетки других зелёных водорослей. Наименее токсичными для почвенных водорослей были НСПАВ, по сравнению с которыми анионные и катионные характеризовались повышенной альготоксичностью.

Мембранотропное влияние СПАВ на водоросли, являющееся следствием нарушения структуры и повышения проницаемости цитоплазматических мембран клеток, проявляется как в накоплении в клетках посторонних соединений, так и в выходе наружу эндобиополимеров [86]. Одновременно с накоплением чужеродных соединений под влиянием СПАВ отмечен выход из клеток около 60% белка, около 30% ДНК, аминокислот и углеводов, утечка калия и усиление протонной проницаемости мембран [87].

СПАВ способны вызывать изменения в прочности связи хлорофилл-белково-липидного комплекса, концентрации хлорофилла *a* в клетках и их фотосинтетической активности у альгологически чистых культур зелёных водорослей *C. vulgaris* и *Ankistrodesmus fusiformis* при использовании катамина АБ (катионный КСПАВ), ДСН (анионный АСПАВ) и гидропола (неионный НСПАВ) в концентрациях 3–5 мг/л [88, 89]. Под влиянием КСПАВ происходит снижение концентрации фотосинтетических пигментов, более существенное и резкое по мере увеличения времени контакта и снижения плотности суспензии. АСПАВ и НСПАВ, наоборот, стимулировали фотосинтетическую активность клеток.

В серии опытов с микроводорослями из разных отделов *Dunaliella salina* (Chlorophyta), *Plagioselmis prolunga* (Cryptophyta) и *Atthey aussurensis* (Bacillariophyta) установлено, что наиболее негативное воздействие действие СПАВ ДСН и используемые в быту детергенты «Обычный порошок» и «Ariel» в концентрациях 0,1; 1 и 10 мг/л оказывают на содержание хлорофилла *a*, каротиноидов и кислородную продуктивность, наименее – на изменение рН культуральной среды, численность клеток и скорость роста популяции [90].

При действии одного и того же СПАВ на разные отделы водорослей их ответные реакции могут быть одинаковыми. Так, препарат ТХ100 вызывал подавление роста клеток и красных, и диатомовых водорослей [91, 92].

Влияние СПАВ на микромицеты. Многие СПАВ могут оказывать как стимулирующие,

так и ингибирующие эффекты на грибы в зависимости от природы СПАВ и систематического положения микромицетов. Например, в опытах с АСПАВ ДСН было установлено его фунгистатическое действие на следующие виды дрожжей: *Saccharomyces cerevisiae*, *Torula roseum*, *Candida albicans*, *Hansenula anomala* и мицелиальных грибов *Aspergillus niger*, *A. flavus*, *Penicillium cyclopium*, *P. chrysogenum* уже в концентрации 0,4–0,75 мг/мл [39]. В присутствии ДСН в большой концентрации не наблюдалось спороношения у мицелиальных грибов, хотя и происходил их рост. В противоположность этому НСПАВ ОП-10 в дозах 2 и 10 г/м² стимулировал размножение почвенных микромицетов в 3,1 раза по сравнению с контролем [93]. Стимулирующей активностью по отношению к грибам р. *Aspergillus* обладают СПАВ из группы Twin, при добавлении которых в питательную среду биомасса гриба увеличивается более, чем в 2 раза и возрастает скорость поглощения питательных веществ на 27–50% [43].

НСПАВ способствуют изменению формы и увеличению размеров клеток дрожжей р. *Candida*, видимо, вследствие более лёгкого проникновения питательных веществ в клетки в присутствии СПАВ [12], могут оказывать положительное воздействие и на рост гриба *Fusarium gibbosum* как при низких концентрациях (0,5%), так и при более высоких (5%) [12].

Другие НСПАВ (Эмульген 120, 909 и 108) ингибировали рост гриба *Puricularia oryzae* на 50–90% уже при концентрации 0,005–0,010% [94].

Выращивание дрожжей на среде с КСПАВ диталаном приводит к нарушению процесса спорообразования [56]. Под воздействием некоторых детергентов («Domestos», «AOS», «Обычный») возможно снижение пенообразующей способности дрожжей *S. cerevisiae* [95, 96].

Своеобразное действие на развитие микромицетов отмечено в опытах с использованием автошампуня Uni [24]. В интервале концентраций данного препарата 0,25–2,00 расчётные дозы (р. д.) происходило постепенное снижение численности грибных популяций. Однако доза 4 р. д. приводила к вспышке размножения микромицетов. Подобное возрастание численности грибов в загрязнённых различными поллютантами почвах неоднократно отмечалось и ранее [97].

На примере дрожжей и мицелиальных грибов, утилизирующих СПАВ, было по-

казано, что первичной адаптивной реакцией является модификация наружных полисахаридных компонентов клеточной оболочки, на которой появляются гидролазы СПАВ [98]. Деструкторы СПАВ обнаружены среди плесневых грибов родов *Penicillium*, *Cladosporium*, *Aspergillus* [99].

Таким образом, циркуляция СПАВ в ОС становится причиной изменения функционирования как отдельных микробных клеток, так и микробоценозов в целом. Сила и глубина воздействия СПАВ на МО обусловлены природой поллютантов, различными абиотическими факторами и систематическим положением МО. СПАВ способны нарушать цитоплазматические мембраны, их липопротеиновый слой, что нарушает потоки веществ в клетку и из клетки. В значительной степени нарушается активность ферментов оксидоредуктаз и гидролаз. У фотосинтезирующих МО происходит снижение активности фотосинтеза, обусловленное нарушением белково-пигментных комплексов. Всё это приводит к снижению видового разнообразия и численности МО, перераспределению их физиологических групп в структуре микробных комплексов, элиминации из них полезных видов.

Изучение адаптационных особенностей резистентных форм МО указывает, что они во многом связаны со способностью МО к синтезу экзополимеров, образующих мощные слизистые чехлы вокруг клеток и со способностью к выработке экзоферментов, гидролизующих СПАВ до компонентов, служащих МО источником питания.

Дальнейшие исследования по влиянию СПАВ на МО перспективны для разработки микробиологических методов биодиагностики и ремедиации экосистем, загрязнённых этими поллютантами.

Литература

1. Ho Tan Tai L., Nardello-Rataj V. Detergents The main surfactants used in detergents and personal care products // Oleagineus, Corp Gras, Lipids. 2001. V. 8. No. 2. P. 141–144.
2. Китмейер Д. Поверхностно-активные вещества в моющих средствах на водной основе // Мир гальваники. 2007. № 4. С. 16–18.
3. Буканова Е.Ф. Коллоидная химия ПАВ. Мицеллообразование в растворах ПАВ. М.: МИТХТ им. М.В. Ломоносова. 2006. 80 с.
4. Ротмистров М.Н., Гвоздяк П.И., Ставская С.С. Микробиология очистки воды. Киев: Наукова думка, 1978. 268 с.

5. Тихонова Ю.В., Хабибуллин Р.Р., Ломакин С.П., Филатова Э.С. Сравнительная оценка основных технологических характеристик разработанных синтетических моющих средств // Башкирский химический журнал. 2006. Т. 13. № 5. С. 50–52.
6. Остроумов С.А. Биологические эффекты при воздействии поверхностно-активных веществ на организмы. М.: МАКС-Пресс. 2001. 334 с.
7. Macias-Zamora J.V., Ramirez-Alvarez N. Tracing sewage pollution using linear alkylbenzenes (LABs in surface sediments at the south end of the Southern California Bight // *Environmental Pollution*. 2004. V. 130. P. 229–238.
8. Куклева К.К. Массообмен и самопроизвольное наноструктурирование поверхностно-активных веществ и полимеров в процессах моющего действия: Дис. ... канд. техн. наук. Москва, 2012. 164 с.
9. Ланге К.Р., Зайченко Л.П. Поверхностно-активные вещества: синтез, свойства, анализ, применение. С-Пб.: Профессия, 2007. 240 с.
10. Bobra A. M., Shiu W. Y., Mackay D. Structure-activity relationships for toxicity of hydrocarbons, chlorinated hydrocarbons and oils to *Daphnia magna* / Quantitative structure activity relations in environmental toxicology / Ed. K. L. E. Kaiser Dordrecht. Germany: D. Reidel Publishing Co., 1984. P. 3–16.
11. Маркина Ж.В., Айздайчер Н.А. Действие детергента ARIEL на рост и физиологическое состояние одноклеточных водорослей // Гидробиологический журнал. 2009. Т. 45. № 6. С. 52–60.
12. Ханисламова Г.М., Кабиров Р.Р., Хазипова Р.Х. Поверхностно-активные вещества в наземных экосистемах. Уфа, 1988. 143 с.
13. Паршикова Т.В., Негруцкий С.Ф. Влияние поверхностно-активных веществ на водоросли // Гидробиологический журнал. 1988. Т. 24. № 6. С. 46–58.
14. Каленеченко К.П. Поверхностно-активные вещества в Киевском водохранилище // Гидробиологический журнал. 1993. Т. 29. № 5. С. 106–108.
15. Медведева А.В., Мынбаева Б.Н. Некоторые элементы мониторинга почвы г. Алматы // Биологический мониторинг природно-техногенных систем: Матер. Всерос. научно-практ. конф. с междунар. участием. Киров, 2011. Кн. 1. С. 86–89.
16. Остроумов С.А. Роль биоты в экологических механизмах самоочищения воды. М.: МАКС Пресс, 2016. 124 с.
17. Колесников С.И. Разработка региональных и локальных нормативов содержания химических веществ в почве по биологическим показателям // Биодиагностика и оценка качества природной среды: подходы, методы, критерии и эталоны сравнения в экотоксикологии: Матер. междунар. симпозиума и молодежной школы. М.: ГЕОС, 2016. С. 120–122.
18. Остроумов С.А. Доказательство решающей роли биоты в улучшении качества воды // Вода: технология и экология. 2010. № 1. С. 32–36.
19. Киреева Н.А., Шабалина Л.В., Галимзянова Н.Ф. Влияние поверхностно-активных веществ на микроорганизмы: II Неонол АФ-14 и ризосферная микрофлора пшеницы. Уфа, 1984. 12 с.
20. Sujbert L., Csatai L. Termeszetes mikrofloraju valyog talajoszlop bakteriumszam valtozasa tenzidek hatasara // *Agrokemia es Talajtan*. 1980. V. 29. No. 1–2. P. 311–322 (на венгерском языке).
21. Шигаева М.Х., Сартбаева У.А., Кайназарова М.М. Роль ПАВ в выделении почвенных микроорганизмов // Микроорганизмы как компонент биогеоценоза: Мат. Всес. симпоз. Алма-Ата, 1982. С. 56.
22. Потапова И.А., Галаган Н.П. Влияние алкилбензолсульфоната натрия на бактериопланктон Киевского водохранилища // Гидробиологический журнал 1993. Т. 19. № 1. С. 44–47.
23. Галиулин Р.В., Семенова Н.А., Галиулина Р.А. Влияние ПАВ и других загрязнителей на целлюлозолитическую активность лугово-аллювиальной почвы // *Агрохимия*. 1999. № 6. С. 86–91.
24. Домрачева Л.И., Симакова В.С. Автошампунь Уні как регулятор численности почвенных микроорганизмов // Биодиагностика природных и природно-техногенных систем. Матер. XV Всерос. научно-практ. конф. с междунар. участием. Книга 2. Киров: ВятГУ, 2017. С. 71–75.
25. Берендеева Л.Л. Выявление токсичных концентраций СПАВ в поливных водах и биохимическая деятельность почвенных микроорганизмов на фоне этих концентраций // Миграция загрязняющих веществ в почвах и сопредельных средах. Тр. IV Всес. совещ. Обнинск. Л.: Гидрометеиздат, 1985. С. 192–194.
26. Szember A., Drażkiewicz M., Wielgosz E. Wpływ niektórych syntetycznych środków strukturotwórczych na wiązanie azotu atmosferycznego przez azotobaktera // *Annales UMCS, Sec. E*. 1980/1981. No. 35/36. P. 287–292 (на польском языке).
27. Кувичкина Т.Н., Будина Д.В., Решетилов А.Н. Окислительная деградация орто-фталата иммобилизованными клетками *Rhodococcus* и *Gluconobacter* // Международный научный институт «Educatio» г. Новосибирск. 2015. Ч. 4. № 5 (12). С. 38–41.
28. Киреева Н.А., Галимзянова Н.Ф. Влияние поверхностно-активных веществ на микроорганизмы: 1. Неонол АФ-14 и протеолитическая активность некоторых сапротрофов. Уфа, 1984. 10 с.
29. Сим Э. Биохимия мембран. М.: Мир, 1985. 109 с.
30. Lombardo M.J., Lee A.A., Knox T.M., Miller C.G. Regulation of the *Salmonella typhimurium* *pepT* gene by cyclic AMP receptor protein (CRP) and FNR acting at a hybrid CRP-FNR site // *J. Bacteriol.* 1997. V. 179 (6). P. 1909–1917.
31. Кушкина А.И., Товкач Ф.И. Лизогения у бактерий и ее значение для биотехнологии // *Биотехнология*. 2011. Т. 4. № 1. С. 29–40.
32. Кучер Р.В., Дзумедзей Н.В., Хмельницкая Д.Л. Комплексное влияние поверхностно-активных ве-

ществ на процесс микробиологического окисления углеводов // Микробиология. 1981. Т. 50. № 6. С. 1105–1108.

33. Панченко Л.В., Турковская О.В., Шуб Г.М. Выделение и изучение микроорганизмов – деструкторов ПАВ // Микробиология. 1981. Т. 50. № 6. С. 217–222.

34. Суковатая И.Е., Кратасюк В.А., Межевикин В.В., Свицерская И.В., Есимбекова Е.Н., Немцева Е.В. Фотобиофизика. [Электронный ресурс]: <http://files.lib.sfu-kras.ru/> (Дата обращения: 10.09.2008).

35. Medvedeva S.E., Tyulkova N.A., Kuznetsov A.M., Rodicheva E.K. Bioluminescent bioassays based on luminous bacteria // Journal of Siberian Federal University. Biology. 2009. No. 2. С. 418–452.

36. Ланге К.Р. Поверхностно-активные вещества: синтез, свойства, применение. С-Пб.: Профессия, 2004. 239 с.

37. Cline T.W. Isolation and characterization of luminescence system mutants in bacteria // Methods in Enzymology. 1978. V. 57. P. 166–171.

38. Ставская С.С., Кривец И.А., Самойленко Л.С. Изучение продуктов разложения додецилсульфата натрия // Прикладная биохимия и микробиология. 1979. Т. 15. № 5. С. 790–792.

39. Ставская С.С. Биологическое разрушение АПАВ. Киев: Наукова думка, 1981. 116 с.

40. Алексеева А.В. Коллоидная химия. СПб.: Наука, 1998. 290 с.

41. Могилевич Н.Ф., Ставская С.С. Химия природных соединений // Микробиологический журнал. 1972. № 5. Т. 34. С. 688–689.

42. Мосичев М.С., Моносов Э.З., Грачева И.М. Локализация глюкозоизомеразы у *Astinomyc esalbogriseolus* 28-3 // Биотехнология. 1986. № 1. С. 41–47.

43. Борисова С.В. Влияние неионогенных поверхностно-активных веществ на глюкозоизомеразную активность продуцента *Streptomyces rubiginosus* AC 836 // КазГУ. 2015. Т. 18. № 18. С. 259–261.

44. Хотенов Д.А. Влияние ПАВ на микроорганизмы // Водные экосистемы и организмы. Матер. научн. конф. М., 2000. С. 85.

45. Мэдди Э., Данн М. Биохимическое исследование мембран. М.: Мир, 1979. 458 с.

46. Елисеев С.А., Снежко И.А., Шульга А.Н. О механизме действия поверхностно-активных веществ на бактериальные клетки. МГУ: Биологический факультет, 1984. С. 4–7.

47. Brudenell A.J.P., Baker D.A., Grayson V.T. Phloem mobility of xenobiotics: tabular review of physicochemical properties governing the output of the Kleier model // J. Plant Growth Regul. 1995. V. 16. P. 215–231.

48. Яковец О.Г., Крытынская Е.Н., Юрин В.М. Индуцированные циперметрином изменения неселективной ионной утечки // Ксенобиотики и живые системы: Матер. III Междунар. науч. конф. Минск. 2008. С. 170–172.

49. Удилова О.Ф., Кривец И.А. Действие додецилсульфата натрия на оптическую плотность и

выживаемость *Pseudomonas aeruginosa* – деструктора алкилсульфатов // Микробиологический журнал. 1982. Т. 45. № 1. С. 13–15.

50. Ротмистров М.Н., Ставская С.С., Кривец И.А. Разрушение алкилсульфатов бактериями // Микробиология. 1978. Т. 47. № 2. С. 338–341.

51. Руководство по определению методом биотестирования токсичности вод, донных отложений загрязняющих веществ и буровых растворов. Москва: РЭФИА, НИА-Природа, 2002. 61 с.

52. Бутовский Р.О. Токсичность для почвенных беспозвоночных техногенных химических загрязнителей – хлорфенолов и анионоактивных синтетических поверхностно-активных веществ // Агрехимия. 2005. № 3. С. 14–18.

53. Богач П.Г., Курский М.Д., Кучеренко Н.Е. Структура и функции биологических мембран. Киев: Высшая школа, 1981. 361 с.

54. Орлов Д.С., Садовникова Л.К., Лозановская И.Н. Экология и охрана биосферы при химическом загрязнении. М.: Высшая школа, 2002. 234 с.

55. Корш Л.Е., Артемова Т.З. Ускоренные методы санитарно-бактериологического исследования воды. М.: Медицина, 1978. 271 с.

56. Лишко Б.И., Шевченко М.И. Мембраны и жизнь клетки. Киев: Наукова думка, 1987. 104 с.

57. Биология и биотехнология микроорганизмов / Под ред. А.Г. Халмурадова, С.М. Ходжибаевой. Ташкент: Фан, 1992. 220 с.

58. Сопрунова О.Б., Утепешева А.А., Виет Гиен Нгуен Микроорганизмы – деструкторы ПАВ в водных средах // Вестник Астраханского ГТУ. Серия: Рыбное хозяйство. 2013. № 1. С. 83–90.

59. Ставская С.С., Кривец И.А., Самойленко Л.С. Изучение продуктов разложения додецилсульфата натрия // Прикладная биохимия и микробиология. 1979. Т. 15. № 5. С. 790–792.

60. 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.

61. Вайтнер Е.В. Технология снижения содержания анионных синтетических поверхностно-активных веществ в поверхностных водных объектах: Дисс. ... канд. техн. наук. Екатеринбург. 2005. 165 с.

62. Панченко Л.В., Турковская О.В., Шуб Г.М. Выделение и изучение микроорганизмов – деструкторов ПАВ // Микробиология. 1981. Т. 50. № 6. С. 217–222.

63. Беляков А.Ю., Головки Д.С., Плешакова Е.С. Определение токсического воздействия на почву бурового раствора углеводородной основы с помощью различных приемов биотестирования // Известия Самарского университета. 2012. Т. 12. № 3. С. 106–113.

64. Лисовицкая О. В., Терехова В. А. Фитотестирование: основные подходы, проблемы лабораторного метода и современные решения // Доклады по экологическому почвоведению. 2010. Вып. 13. № 1. С. 1–18.

65. Хасанова Л.А., Иванов А.Ю., Маркелія Л.Ю., Хасанова З.М. Сравнительное изучение чувствительности представителей и к действию анионного детергента // Альгология. 1999. Т. 9. № 2. С. 149.
66. Ostroumov S.A. Aquatic ecosystem as a bioreactor: water purification and some other functions // Rivista di biologia. 2004. V. 97 (1). P. 67–78.
67. Симакова В.С., Домрачева Л.И., Огородникова С.Ю., Фокина А.Н., Ашихмина Т.Я. Влияние фосфорсодержащих автошампуней на развитие почвенных цианобактерий // Теоретическая и прикладная экология. 2016. № 3. С. 89–94.
68. Симакова В.С., Огородникова С.Ю., Домрачева Л.И. Изучение накопления формазана в клетках цианобактерий *Nostoc paludosum* под влиянием автошампуней // Актуальные проблемы региональной экологии и биодиагностики живых систем. Матер. XIII Всерос. научно-практ. конф. с междунар. участием. 2015. Книга 1. Киров: Веси, 2015. С. 278–281.
69. Симакова В.С. Домрачева Л.И. Влияние возрастающих концентраций автошампуня Upi на развитие цианобактерии *Nostoc paludosum* // Экология родного края: проблемы и пути их решения. Матер. XII Всерос. научно-практ. конф. с междунар. участием. Книга 2. Киров: ВятГУ, 2017. С. 260–262.
70. Симакова В.С., Домрачева Л.И., Фокина А.И. Исследование влияния синтетических поверхностно-активных веществ на рост и развитие почвенной цианобактерии *Nostoc paludosum* // Учёные записки Петрозаводского государственного университета. 2017. № 4 (165). С. 65–69.
71. Симакова В.С., Домрачева Л.И. Влияние возрастающих концентраций синтетических поверхностно-активных веществ на развитие цианобактерии *Nostoc paludosum* // 1-й Российский микробиологический конгресс: сборник тезисов. Материалы конгресса. 2017. Москва: ИД Вода, химия и экология, 2017. С. 80.
72. Симакова В.С., Трефилова Л.В., Фокина А.И., Домрачева Л.И. Сравнение влияния СПАВ на рост и развитие почвенной цианобактерии *Nostoc paludosum* в стерильной почве // Биодиагностика природных и природно-техногенных систем. Матер. XV Всерос. научно-практ. конф. с междунар. участием. 2017. Книга 2. Киров: ВятГУ, 2017. С. 75–79.
73. Леонова Л.И., Ступина В.В., Ставская С.С. Царенко П.М. Избирательная устойчивость водорослей к некоторым компонентам сточных вод // Альгология. 1991. Т. 1. № 1. С. 69–74.
74. Senborn J.R., Metcalf R.L., Yu C.C., Lu P.Y. Plasticizers in the environment: the fate of di-N-octyl-phthalate (DOP) in two model ecosystems and uptake and metabolism of DOP by aquatic organisms // Arch. Environ. Contam. and Toxicol. 1975. V. 3. No. 2. P. 244–255.
75. Pedersen K. Explorattion of deep intraterrestrial microbial life: current perspectives // Microbiological Letters. 2000. V. 185. P. 9–16.
76. Chawla G., Viswanathan P.N., Devi S. Biochemical studies on the toxicity of linear alkyl-benzene sulphonate to *Scenedesmus quadricauda* in culture // Environ. Exp. Bot. 1987. No. 27. P. 311–323.
77. Chawla C.E., Viswanatthan P.N., Santha D. Effect of linear alkyl-benzene sulfonate on *Scenedesmus quadricauda* in culture // Environ. and Exp. Bot. 1986. V. 26. No. 1. P. 39–51.
78. Lundaht P., Cabridenc R. Molecular structure-biological properties relationships in anionic surface-active agents // Water Res. 1978. V. 12. No. 1. P. 25–30.
79. Ernst R., Gonzates J.C., Arditti J. Eeffects of anionic, non-ionic and amphoteric surfactans on a green alga (*Chlamydomonas*) // Envirom. Pollut. (Ser. A). 1983. V. 31. No. 3. P. 159–175.
80. Парфёнова И.А. Сравнительная оценка действия анионного и катионного детергентов на рост накопительных культур микроводоросли *Platymonas viridis* // Учёные записки Таврического национального университета им. В.И. Вернадского. Серия «Биология. Химия». 2013. Т. 26 (65). № 2. С. 154–158.
81. Masakorala K., Turner A., Brown M.T. Toxity of synthetic surfactant stothe marine macroalga *Ulva lactuca* // Water, Air, Soil Pollut. 2011. V. 218. P. 283–291.
82. Леонова Л.И., Ступина В.В. Водоросли в очистке сточных вод. Киев: Наукова думка, 1990. 184 с.
83. Остроумов С.А., Колопилова Н.Н., Пискунова Н.Ф., Лямин М.Я., Краевский Н.И. Изучение воздействия синтетических поверхностно-активных веществ на Chyanophyta и Chlorophyta // Альгология. 1999. Т. 9. № 2. С. 105–106.
84. Паршикова Т.В. Сравнительная оценка чувствительности различных видов водорослей к действию катионоактивного детергента и некоторых металлов // Альгология. 1999. Т. 9. № 2. С. 109–110.
85. Хазипова Р.Х. Влияние синтетических поверхностно-активных веществ на почвенные водоросли // Альгология. 1999. Т. 9. № 2. С. 147.
86. Паршикова Т.В., Негруцкий С.Ф. Влияние поверхностно-активных веществ на водоросли (обзор) // Гидробиологический журнал. 1988. Т. 24. № 6. С. 46–58.
87. Matsuyama T., Murakami T., Fujita M. Extracellular vesicle formation and biosurfactant production by *Serratia marcescens* // J. Gen. Microbiol. 1986. V. 132. No. 4. P. 27–35.
88. Липницкая Г.П., Паршикова Т.В. Изменения в прочности связи хлорофилл-белково-липидного комплекса водорослей под влиянием поверхностно-активных веществ // Гидробиологический журнал. 1992. Т. 28. № 6. С. 60–67.
89. Паршикова Т.В., Веселовский В.В., Веселова Т.В., Дмитриева А.Г. Влияние поверхностно-активных веществ на функционирование фотосинтетического аппарата хлореллы // Альгология. 1994. Т. 4. № 1. С. 38–46.
90. Маркина Ж.В. Применение микроводорослей для оценки качества морской воды и действия детер-

гентов: Автореф. ... дис. канд. биол. наук. Владивосток, 2008. 22 с.

91. Nyberg H., Koskimies-Soininen K. The glycolipid fatty acids of *Porphyridium purpureum* cultured in the presence of detergents // *Phytochemistry*. 1984. V. 23. No. 4. P. 751–757.

92. Nyberg H., Koskimies-Soininen K. The phospholipid fatty acids of *Porphyridium purpureum* cultured in the presence of Triton X-100 and sodium desoxycholate // *Phytochemistry*. 1984. V. 23. No. 11. P. 2489–2495.

93. Киреева Н.А., Шабалина Л.В., Галимзянова Н.Ф. Влияние поверхностно-активных веществ на микроорганизмы: III. ОП-10 и почвенная микрофлора. Уфа, 1984. 10 с.

94. Watanabe M., Ohyanagi H., Saitoh Y. Experimental study on anaphylactic effects by Fluosol-DA // *J. Artif. Organs*. 1988. V. 17. P. 1513–1522.

95. Вятчина О.Ф., Жданова Г.О. Пенообразование в суспензии дрожжей как экспресс тест-реакция // *Научные достижения европейской науки – 2011: Матер. VII Междунар. практ. конф. София: Бел-Град-БГ, 2011. С. 60–64.*

96. Жданова Г.О., Вятчина О.Ф. Новая тест-реакция для определения некоторых классов загрязнителей в окружающей среде // *Известия Иркутской ГЭА*. 2011. № 1. [Электронный журнал] <http://eizvestia.isea.ru> (Дата обращения 01.03.2018).

97. Микроорганизмы и охрана почв / Под ред. Д.Г. Звягинцева. М.: Изд-во МГУ, 1989. 206 с.

98. Дмитриев В.В., Звонарев А.Н. Структурно-функциональные перестройки микроорганизмов при адаптации к экстремальным факторам внешней среды // 1-й Российский микробиологический конгресс: сборник тезисов. Материалы конгресса. 2017. Москва: ИД Вода, химия и экология, 2017. С. 38–39.

99. Сармурзина З.С. Изучение липолитических свойств бактерий рода *Bacillus* для биологической очистки сточных вод от жировых отложений // «Ломоносов-2009»: Матер. Междунар. конф. студентов, аспирантов и молодых ученых. Москва, 2009. С. 18–19.

References

1. Ho Tan Tai L., Nardello-Rataj V. Detergents the main surfactants used in detergents and personal care products // *Oleagineus, Corp Gras, Lipids*. 2001. V. 8. No. 2. P. 141–144.

2. Quitmeyer D. Surfactants in detergents based on water // *Mir galvaniki*. 2007. No. 4. P. 16–18 (in Russian).

3. Bukanova E.F. Colloid chemistry of surfactants. Micelle formation in solutions of surfactants. Moskva: MITKhT imeni M.V. Lomonosova. 2006. 80 p. (in Russian).

4. Rotmistrov M.N., Gvozdyak P.I., Stavskaya S.S. The microbiology of water purification. Kiev: Naukova dumka, 1978. 268 p. (in Russian).

5. Tikhonova Yu.V., Khabibullin R.R., Lomakin S.P., Filatova E.S. Comparative evaluation of the main characteristics of the developed synthetic detergents // *Bashkirskiy khimicheskiy zhurnal*. 2006. V. 13. No. 5. P. 50–52 (in Russian).

6. Ostroumov S.A. Biological effects on organisms when exposed with surfactants. Moskva: MAX-Press. 2001. 334 p. (in Russian).

7. Macias-Zamora J.V., Ramirez-Alvarez N. Tracing sewage pollution using linear alkylbenzenes (LABs) in surface sediments at the south end of the Southern California Bight // *Environmental Pollution*. 2004. V. 130. P. 229–238.

8. Kukleva K.K. Mass transfer and spontaneous nanostructuring of surfactants and polymers in the processes of cleaning: Dis. ... kand. tekh. nauk. Moskva: Rossiyskiy gosudarstvennyy universitet turizma i servisa. 2012. 164 p. (in Russian)

9. Lange K.R., Zaichenko L.P. Surfactants: synthesis, properties, analysis, application. Sankt-Peterburg: Profesiya, 2007. 240 p. (in Russian)

10. Bobra A.M., Shiu W.Y., Mackay D. Structure-activity relationships for toxicity of hydrocarbons, chlorinated hydrocarbons and oils to *Daphnia magna* // *Quantitative structure activity relations in environmental toxicology / Ed. K.L.E. Kaiser Dordrecht. Germany: D. Reidel Publishing Co., 1984. P. 3–16.*

11. Markina Zh.V., Aizdaicher N.A. The effect of ARIEL detergent on the growth and physiological state of the unicellular algae // *Gidrobiologicheskiy zhurnal*. 2009. V. 45. No. 6. P. 52–60 (in Russian).

12. Khanislamova G.M., Kabirov R.R., Khazipova R.H. Surfactants in terrestrial ecosystems. Ufa, 1988. 143 p. (in Russian).

13. Parshikova T.V., Negrutskii S.F. Influence of surfactants on algae // *Gidrobiologicheskiy zhurnal*. 1988. V. 24. No. 6. P. 46–58 (in Russian).

14. Kalenechenko K.P. Surfactants in the Kiev reservoir // *Gidrobiologicheskiy zhurnal*. 1993. V. 29. No. 5. P. 106–108 (in Russian).

15. Medvedeva A.V., Mynbaeva B.N. Some elements of soil monitoring in Almaty // *Biological monitoring of natural and man-made systems: Sbornik materialov vserossiyskoy nauchno-prakticheskoy konferentsii*. Kirov: Izdatelstvo VyatGGU, 2011. Kniga 1. P. 86–89 (in Russian).

16. Ostroumov S.A. The role of biota in ecological mechanisms of water self-purification. Moskva: MAKSPress, 2016. 124 p. (in Russian).

17. Kolesnikov S.I. The Development of regional and local standards for chemical substances in soil biological indicators // *Biodiagnostics and evaluation of the quality of the natural environment: approaches, methods, criteria, and standards of comparison in ecotoxicology: Sbornik materialov mezhdunarodnogo simpoziuma i molodezhnoy shkoly*. Moskva: GEOS, 2016. P. 120–122 (in Russian).

18. Ostroumov S.A. Proving of the crucial role of biota in improving water quality // Voda: tekhnologiya i ekologiya. 2010. No. 1. P. 32–62 (in Russian).
19. Kireeva N.A., Shabalina L.V., Galimzyanova N.F. The influence of surfactants on microorganisms: II Neonol AF-14 and rhizosphere microflora of wheat. Ufa, 1984. 12 p. (in Russian).
20. Sujbert L., Csatai L. Effect of tenzides (detergents) on the number of bacteria in a loam column with natural microflora // Agrokemia es Talajtan. 1980. V. 29. No. 1–2. P. 311–322 (in Hungarian).
21. Shigaeva M.Kh., Sartbaeva U.A., Kainazarova M.M. The role of surfactants in the selection of soil microorganisms // Microorganisms as a component of biogeocenosis: Sbornik materialov vsoyuznogo simpoziuma. Alma-Ata: Nauka, 1982. P. 56 (in Russian).
22. Potapova I.A., Galagan N.P. Effect of sodium alkylbenzene sulfonate on bacterioplankton of the Kiev reservoir // Hidrobiologicheskij zhurnal. 1993. V. 19. No. 1. P. 44–47 (in Russian).
23. Galiulin R.V., Semenova N.A., Galiulina R.A. Influence of surfactants and other contaminants on the cellulolytic activity of meadow-alluvial soils // Agrokhiimiya. 1999. No 6. P. 86–91 (in Russian).
24. Domracheva L.I., Simakova V.S. Uni car shampoo as a regulator of soil microorganisms number // Biondiagnostics of natural and natural-technogenic systems. Sbornik materialov XV vserossiyskoy nauchno-prakticheskoy konferentsii s mezhdunarodnym uchastiem. Kniga 2. Kirov: VyatGU, 2017. P. 71–75 (in Russian).
25. Berendeeva L.L. Identification of toxic concentrations of detergents in irrigation waters and biochemical activities of soil microorganisms on the background of these concentrations // Migration of pollutants in soils and adjacent environments. Sbornik trudov IV vsoyuznogo soveshchaniya. Obninsk. Leningrad: Gidrometeoizdat, 1985. P. 192–194 (in Russian).
26. Szember A., Drazkiewicz M., Wielgosz E. The influence of some synthetic structure-forming agents on the binding of atmospheric nitrogen by nitrobacteria // Ann. UMCS. 1980/1981. No. 35/36. P. 285–292 (in Polish).
27. Kuvichkina T.N., Budina D.V., Reshetilov A.N. Oxidative degradation of orthophthalate by immobilized *Rhodococcus* and *Gluconobacter* cells // Mezhdunarodnyy nauchnyy institut “Educatio”. Novosibirsk, 2015. Part 4. No. 5 (12). P. 38–41 (in Russian).
28. Kireeva N.A., Galimzyanova N.F. The influence of surfactants on microorganisms: 1. Neonol AF-14 and proteolytic activity of some saprotrophs. Ufa, 1984. 10 p. (in Russian).
29. Sim E. Membrane biochemistry. University of Oxford, UK. 1982. 80 p.
30. Lombardo M.J., Lee A.A., Knox T.M., Miller C.G. Regulation of the *Salmonella typhimurium* pepT gene by cyclic AMP receptor protein (CRP) and FNR acting at a hybrid CRP-FNR site // J. Bacteriol. 1997. V. 179 (6). P. 1909–1917.
31. Kushkina A.I., Tovkach F.I. Lysogeny in bacteria and its significance for biotechnology // Biotekhnologiya. V. 4. 2011. No. 1. P. 29–40 (in Russian).
32. Kucher R.V., Dzumedzey N.V., Khmelnytsky D.L. Complex effect of surfactants on the process of microbiological oxidation of hydrocarbons // Mikrobiologiya. 1981. V. 50. No. 6. P. 1105–1108 (in Russian).
33. Panchenko L.V., Turkovskaya O.V., Shub G.M. The isolation and study of microorganisms – destructors of surfactants // Mikrobiologiya. 1981. V. 50. No. 6. P. 217–222 (in Russian).
34. Sukovataya I.E., Kratasyuk V.A., Mezhevikin V.V., Sviderskaya I.V., Esimbekova E.N., Nemtseva E.V. Photobiophysics [Internet resource]: <http://files.lib.sfu-kras.ru/> (Accessed: 10.09.2008).
35. Medvedeva S.E., Tyulkova N.A., Kuznetsov A.M., Rodicheva E.K. Bioluminescent bioassays based on luminous bacteria // Journal of Siberian Federal University. Biology. 2009. No. 2. P. 418–452.
36. Lange K.R. Surfactants: synthesis, properties, application. Sankt-Peterburg: Professiya, 2004. 239 p. (in Russian).
37. Cline T.W. Isolation and characterization of luminescence system mutants in bacteria // Methods in Enzymology. 1978. V. 57. P. 166–171.
38. Stavskaya S.S., Krivets I.A., Samoilenko L.S. The study of the decomposition products of sodium dodecyl sulfate // Prikladnaya biokhimiya i mikrobiologiya. 1979. V. 15. No. 5. P. 790–792 (in Russian).
39. Stavskaya S.S. The biological degradation of anionic surfactants. Kiev: Naukova dumka, 1981. 116 p. (in Russian).
40. Alekseeva A.V. Colloid chemistry. Sankt-Peterburg: Nauka, 1998. 290 p. (in Russian).
41. Mogilevich N.F., Stavskaya S.S. Chemistry of natural compounds // Mikrobiologicheskij zhurnal. 1972. No. 5. V. 34. P. 688–689 (in Russian).
42. Mosichev M.S., Monosov E.Z., Gracheva M.I. Localization of glucose isomerase in *Astinomyces esalboigriseolus* 28-3 // Biotekhnologiya. 1986. No. 1. P. 41–47 (in Russian).
43. Borisova S.V. The influence of nonionic surfactants on glucose isomerase activity of producer *Streptomyces rubiginosus* AC 836 // KazTU. 2015. V. 18. No. 18. P. 259–261 (in Russian).
44. Khotenov D. A. Influence of surfactants on microorganisms // The Aquatic ecosystem and organisms: Sbornik materialov nauchnoy konferentsii. Moskva, 2000. P. 85 (in Russian).
45. Meddy E., Dann M. Biochemical study of membranes. Moskva: Mir, 1979. 458 p. (in Russian).
46. Eliseev S.A., Snezhko, I.A., Shulga A.N. On the mechanism of action of surfactants on bacterial cells. MGU: Biologicheskij fakultet, 1984. P. 4–7 (in Russian).

47. Brudenell A.J.P., Baker D.A., Grayson B.T. Phloem mobility of xenobiotics: tabular review of physicochemical properties governing the output of the Kleier model // *J. Plant Growth Regul.* 1995. V. 16. P. 215–231.
48. Yakovets O.G., Krytynskaya E.N., Yurin V.M. Changes of non-selective ion leakage Induced by cypermetrine // *Xenobiotics and living systems: Sbornik materialov III mezhdunarodnoy nauchnoy konferentsii.* Minsk: BGU. 2008. P. 170–172 (in Russian).
49. Udilova O.F., Kravets I.A. Effect of sodium dodecyl sulfate on optical density and survival of *Pseudomonasaeruginosa* – destructor of alkyl sulphates // *Microbiologicheskii zhurnal.* 1982. V. 45. No. 1. P. 13–15 (in Russian).
50. Rotmistrov M.N., Stavskaya S.S., Krivets I.A. The Destruction of alkyl sulfates by bacteria // *Microbiologiya.* 1978. V. 47. No. 2. P. 338–341 (in Russia).
51. The guidelines for determining the method of biotesting of toxicity of waters, bottom sediments, pollutants and drilling fluids. Moskva: REFIA, NIA-Priroda, 2002. 61 p. (in Russian).
52. Butovsky R.O. Toxicity to soil invertebrates anthropogenic chemical pollutants – chlorophenols and synthetic anion-active surface-active substances // *Agrokhiimiya.* 2005. No. 3. P. 14–18 (in Russian).
53. Bogach P.G., Kursky M.D., Kucherenko N.E. Structure and function of biological membranes. Kiev: Vysshaya shkola, 1981. 361 p. (in Russian).
54. Orlov D.S., Sadovnikova L.K., Lozanovskaya I.N. Ecology and conservation of the biosphere under chemical pollution. Moskva: Vysshaya shkola, 2002. 234 p. (in Russian).
55. Korsh L.E., Artemova T.Z. Rapid methods of sanitary-bacteriological research of water. Moskva: Meditsina, 1978. 271 p. (in Russian).
56. Lisko B.I., Shevchenko M.I. Membrane and cell life. Kiev: Naukova dumka, 1987. 104 p. (in Russian).
57. Biology and biotechnology of microorganisms / Ed. A.G. Halmuradov, S.M. Khodzhbayeva. Tashkent: Fan, 1992. 220 p. (in Russian).
58. Soprunova O.B., Utepesheva A.A., Viet Hyen Nguyen Microorganisms – destructors of sas in water environments // *Vestnik Astrakhanskogo GTU. Seriya: Rybnoe khozyaystvo.* 2013. No. 1. P. 83–90 (in Russian).
59. Stavskaya S.S., Krivets I.A., Samoylenko L.S. The study of the decomposition products of sodium dodecyl sulfate // *Prikladnaya biokhiimiya i microbiologiya.* 1979. V. 15. No. 5. P. 790–792 (in Russian).
60. 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.
61. Vaitner E.V. Technology of reducing the amount of anionic synthetic surface-active substances in superficial water objects: Diss. ... kand. tekhn. nauk. Ekaterinburg. 2005. 165 p. (in Russian).
62. Panchenko L.V., Turkovskaya O.V., Shub G.M. The isolation and study of microorganisms – destructors of surfactants // *Microbiologiya.* 1981. V. 50. No. 6. P. 217–222 (in Russian).
63. Belyakov A.Yu., Golovko D.S., Pleshakova E.S. Determination of toxic effect of hydrocarbon base drilling mud on soil by means of different methods of biotesting // *Izvestiya Samarskogo universiteta.* 2012. V. 12. No. 3. P. 106–113 (in Russian).
64. Lisovitskaya O.V., Terekhova V.A. Phytotesting: main approaches, problems and laboratory technique and modern solutions // *Doklady po ekologicheskomy pochvovedeniyu.* 2010. V. 13. No. 1. P. 1–18 (in Russian).
65. Khasanova L.A., Ivanov A.Yu., Markelia L.Yu., Khasanova Z.M. Comparative study of the sensitivity of representatives to the action of anionic detergent // *Algologiya.* 1999. V. 9. No. 2. P. 149 (in Russian).
66. Ostroumov S.A. Aquatic ecosystem as a bioreactor: water purification and some other functions // *Rivista di biologia.* 2004. V. 97 (1). P. 67–78.
67. Simakova V.S., Domracheva L.I., Ogorodnikova S.Yu., Fokina A.I., Ashikhmina T.Ya. Effect of phosphorus autoshampoos on the development of soil cyanobacteria // *Teoreticheskaya i prikladnaya ekologiya.* 2016. No. 3. P. 89–94 (in Russian).
68. Simakova S.V., Ogorodnikova S.Yu., Domracheva L.I. Study of the accumulation of formazan in the cells of the cyanobacteria *Nostoc paludosum* under the influence of vodka // *Actual problems of regional ecology and biodiagnostic living systems: Sbornik materialov XIII vserossiyskoy nauchno-prakticheskoy konferentsii s mezhdunarodnym uchastiem.* 2015. Kniga 1. Kirov: Vesi, 2015. P. 278–281 (in Russian).
69. Simakova V.S., Domracheva L.I. Influence of increasing concentrations of Uni auto shampoo on the development of cyanobacteria *Nostoc paludosum* // *Ecology of native land: problems and ways of their solution: Sbornik materialov XII vserossiyskoy nauchno-prakticheskoy konferentsii s mezhdunarodnym uchastiem.* Kniga 2. Kirov: VyatGU, 2017. P. 260–262 (in Russian).
70. Simakova V.S., Domracheva L.I., Fokina A.I. A Study of the synthetic surface active substances effect on the growth and development of the soil cyanobacterium *Nostoc paludosum* // *Uchenye zapiski Petrozavodskogo gosudarstvennogo universiteta.* 2017. No. 4. P. 65–69 (in Russian).
71. Simakova V.S., Domracheva L.I. Influence of increasing concentrations of synthetic surfactants on the development of cyanobacteria *Nostoc paludosum* // *1st Russian microbiological Congress: collection of abstracts: Sbornik materialov kongressa.* Moskva: ID Woda, khimiya i ekologiya, 2017. P. 80 (in Russian).
72. Simakova S.V., Trefilova L.V., Fokina A.I., Domracheva L.I. Comparison of effect of detergents on the growth and development of the soil cyanobacterium *Nostoc paludosum* in a sterile soil // *Biodiagnostics natural and natural-technogenic systems: Sbornik materialov*

XV vserossiyskoy nauchno-prakticheskoy konferentsii s mezhdunarodnym uchastiem. Kniga 2. Kirov: VyatGU, 2017. P. 75–79 (in Russian).

73. Leonova L.I., Stupina V.V., Stavskaya S.S., Tsarenko P.M. Selective resistance of algae to certain sewage components // *Algologiya*. 1991. V. 1. No. 1. P. 69–74 (in Russian).

74. Senborn J.R., Metcalf R.L., Yu C.C., Lu P.Y. Plasticizers in the environment: the fate of di-N-octyl-phtalate (DOP) in two model ecosystems and uptake and metabolism of DOP by aquatic organisms // *Arch. Environ. Contam. and Toxicol.* 1975. V. 3. No. 2. P. 244–255.

75. Pedersen K. Explorattion of deep intraterrestrial microbial life: current perspectives // *Microbiological Letters*. 2000. V. 185. P. 9–16.

76. Chawla G., Viswanathan P. N., Devi S. Biochemical studies on the toxicity of linear alkyl-benzene sulpho-nate to *Scenedesmus quadricauda* in culture // *Environ. Exp. Bot.* 1987. No. 27. P. 311–323.

77. Chawla C. E., Viswanatthan P. N., Santha D. Effect of linear alkyl-benzene sulfonate on *Scenedesmus quadricauda* in culture // *Environ. and Exp. Bot.* 1986. V. 26. No. 1. P. 39–51.

78. Lundaht P., Cabridenc R. Molecular structure-biological properties relationships in anionic surface-activ agents // *Water Res.* 1978. V. 12. No. 1. P. 25–30.

79. Ernst R., Gonzates J.C., Arditti J. Eeffects of anionic, non-ionic and amphoteric surfactans on a green alga (*Chlamydomonas*) // *Envirom. Pollut. (Ser. A)*. 1983. V. 31. No. 3. P. 159–175.

80. Parfenova I.A. Comparative evaluation of the effects of anionic and cationic detergents on the growth of accumulative cultures of microalgae *Platymonas viridis* // *Uchenye zapiski Tavricheskogo natsionalnogo universiteta im. V.I. Vernadskogo. Seriya «Biologiya. Khimiya»*. 2013. V. 26 (65). No. 2. P. 154–158 (in Russian).

81. Masakorala K., Turner A., Brown M.T. Toxity of sunthetic surfactant stothe marine macroalga *Ulva lactuca* // *Water, Air, Soil Pollut.* 2011. V. 218. P. 283–291.

82. Leonova L.I., Stupina V.V. Algae in tertiary treatment of sewage. Kiev: Naukova dumka, 1990. 184 p. (in Russian).

83. Ostroumov S.A., Kolotilova N.N., Piskunova N.F., Lyamin M.Ya., Kraevsky N.I. To study the effect of synthetic surfactants on Chyanophyta and Chlorophyta // *Algologiya*. 1999. V. 9. No. 2. P. 105–106 (in Russian).

84. Parshikova T.V. Comparative assessment of sensitivity of different types of algae to the action of cationic detergent and some metals // *Algologiya*. 1999. V. 9. No. 2. P. 109–110 (in Russian).

85. Khazipova R.H. The Effect of synthetic surfactants on soil algae // *Algologiya*. 1999. V. 9. No. 2. P. 147 (in Russian).

86. Parshikova T.V., Negrutskii S.F. Influence of surfactants on algae (a review) // *Gidrobiologicheskii zhurnal*. 1988. V. 24. No. 6. P. 46–58 (in Russian).

87. Matsuyama T., Murakami T., Fujita M. Extracel-lular vesic lo formation and biosurfactant production by *Serratia marcescens* // *J. Gen. Microbiol.* 1986. V. 132. No. 4. P. 27–35.

88. Lipnitskaya G.P., Parshikova T.V. Changes in the bond strength of chlorophyll-protein-lipid complex of algae under the influence of surfactants // *Gidrobiologicheskii zhurnal*. 1992. V. 28. No. 6. P. 60–67 (in Russian).

89. Parshikova T.V., Veselovskiy V.V., Veselova T.V., Dmitriev A.G. Influence of surface-active substancies on the function of chlorella photosynthetic apparatus // *Algologiya*. 1994. V. 4. No. 1. P. 38–46 (in Russian).

90. Markina Zh.V. the Use of microalgae to assess the quality of sea water and the action of detergents: Av-toref. diss. ... kand. biol. nauk. Vladivostok, 2008. 22 p. (in Russian).

91. Nyberg H., Koskimies-Soininten K. The gly-colipid fatty acids of *Porphyridium purpureum* cultured in the presence of detergents // *Phytochemistry*. 1984. V. 23. No. 4. P. 751–757.

92. Nyberg H., Koskimies-Soininten K. The phospho-lipid fatty acids of *Porphyridium purpureum* cultured in the presense of Triton X-100 and sodium desoxycholate // *Phytochemistry*. 1984. V. 23. No. 11. P. 2489–2495.

93. Kireeva N.A. Shabalina L.V., Galimzyanova N.F. The influence of surfactants on microorganisms: III. OP-10 and soil microflora. Ufa, 1984. 10 p. (in Russian).

94. Watanabe M., Ohyanagi H., Saitoh Y. Experi-mental study on anaphylactic effects by Fluosol-DA // *J. Artif. Organs*. 1988. V. 17. P. 1513–1522.

95. Vyatchina O.F., Zhdanov G.O. Foaming in sus-pension of yeast as the Express test reaction// *Scientific achievements of European science – 2011: Sbornik mate-rialov VII mezhdunarodnoy prakticheskoy konferentsii*. Sofia: Bel-Grade-BG, 2011. P. 60–64 (in Russian).

96. Zhdanova G.A., Vyatchina O.F. A new test reaction for the determination of certain classes of con-taminants in the environment // *News of Irkutsk GEA*. 2011. No. 1 [Internet journal] <http://eizvestia.isea.ru/> (Accessed: 01.03.2018).

97. *Microorganisms and soil protection* / Ed. D.G. Zvyagintsev. Moskva: Izd-vo MGU, 1989. 206 p. (in Russian).

98. Dmitriev V.V., Zvonarev A.N. Structural and functional perestroika of microorganisms in adaptation to extreme environmental factors // *1st Russian microbio-logical Congress: a collection of abstracts: Sbornik mate-rialov kongressa*. Moskva: ID Voda: khimiya i ekologiya, 2017. P. 38–39 (in Russian).

99. Sarmurzina Z.S. Study of lipolytic properties of bacteria of genus *Bacillus* for biological treatment of waste water from fatty deposits // “Lomonosov-2009”: *Sbornik materialov mezhdunarodnoy konferetsii stu-dentov, aspirantov i molodykh uchenykh*. Moskva, 2009. P. 18–19 (in Russian).

Анализ сезонной и многолетней динамики вегетационного индекса NDVI на территории государственного природного заповедника «Нургуш»

© 2017. Т. А. Адамович¹, к. г. н., доцент, Г. Я. Кантор^{1,2}, к. т. н., н. с.,
Т. Я. Ашихмина^{1,2}, д. т. н., профессор, зав. кафедрой, зав. лабораторией,
В. П. Савиных^{1,3}, д. т. н., профессор, член-корреспондент РАН,

¹Вятский государственный университет,

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

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

³Московский государственный университет геодезии и картографии,
105064, Россия, г. Москва, ул. Гороховский пер., 4,
e-mail: ttjnadamvich@rambler.ru

В работе приведены результаты изучения динамики вегетационного индекса NDVI (Normalized Difference Vegetation Index) для идентификации и картографирования наземной растительности по спутниковым данным Landsat на территории государственного природного заповедника «Нургуш». К особенностям предложенного подхода относится оценка значений указанных спектральных индексов отдельно для сосновых, лиственных лесов и луговых фитоценозов. Выбор данных природных объектов основан на их различной чувствительности к воздействию природных и антропогенных факторов среды. Получена и проанализирована сезонная и многолетняя динамика NDVI разных видов растительности на исследуемой территории в период с 1988 по 2016 гг. Установлено, что значения индекса выше в летние месяцы (июнь, август), чем в осенние (октябрь). Выявлены низкие значения NDVI для растительных объектов при анализе снимков за 18 июля 1994 г. и 7 августа 2010 г. по сравнению со значениями индекса за другие годы съёмки. Это связано с низкой среднемесячной температурой воздуха (14,2 °С) и небольшим количеством осадков в 1994 г. и относительно засушливым и жарким летом 2010 г. (средняя температура в летний период составила 24,7 °С). Выявлено влияние загрязнения от крупного промышленного комплекса на значения индекса NDVI для сосновых лесов. Установлено, что сосновые леса, расположенные на территории промышленной агломерации центра Кировской области, имеют более низкие значения индекса по сравнению с аналогичными лесными массивами, расположенными на территории государственного природного заповедника «Нургуш». Наблюдается тенденция к снижению значений вегетационного индекса на территории вблизи крупных промышленных предприятий.

Ключевые слова: сезонная и многолетняя динамика, вегетационные индексы, Normalized Difference Vegetation Index, Landsat, карты NDVI.

The analysis of seasonal and long-term dynamics of the vegetative NDVI index in the territory of the State Nature Reserve “Nurgush”

T. A. Adamovich¹, G. Ya. Kantor^{1,2}, T. Ya. Ashikhmina^{1,2}, V. P. Savinykh^{1,3},

¹Vyatka State University,

36 Moskovskaya St., Kirov, Russia, 610000,

²Institute of Biology of Komi Scientific Center of the Ural Branch of RAS,
28 Kommunisticheskaya St., Syktyvkar, Russia, 167982,

³Moscow State University of Geodesy and Cartography,
4 Gorokhovskiy Pereulok, Moscow, Russia, 105064,

e-mail: ttjnadamvich@rambler.ru

Results of studying the NDVI (Normalized Difference Vegetation Index) dynamics for identification and mapping land vegetation according to satellite data of Landsat in the territory of the State nature reserve “Nurgush” in Kirov Region of Russia are given. The features of the proposed approach include the estimation of the values of this spectral index separately for pine, deciduous forests and meadow phytocenoses. The choice of these natural objects is based on their different sensitivity to the impact of natural and anthropogenic environmental factors. Seasonal and long-term

dynamics of NDVI for different types of vegetation in the explored territory during the period from 1988 to 2016 is obtained and analysed. It is established that values of the index are higher in summer months (June, August), than in autumn (October). Low NDVI values for vegetal objects on satellite images for July 18, 1994 and on August 7, 2010 are revealed in comparison with values of the index for other years of pictures obtained. This is probably due to the low average monthly air temperature (14.2 °C) and a small amount of rainfall in 1994 and rather droughty and hot summer of 2010 (average temperature during the summer period was 24.7 °C). Influence of pollution from a large industrial complex on values of the NDVI for the pine woods has been investigated. It is established that the pine woods located in the territory of industrial agglomeration of the center of the Kirov region have lower values of the index in comparison with the similar forests located in the territory of the State nature reserve "Nurgush". The tendency to decrease in values of the vegetative index in the close vicinity of large industrial enterprises is observed.

Keywords: seasonal and long-term dynamics, vegetative indexes, Normalized Difference Vegetation Index, Landsat, NDVI maps.

Для исследования и оценки состояния растительности широко применяют так называемые вегетационные индексы [1]. В настоящее время существует около 160 их вариантов. Они подбираются экспериментально, исходя из известных особенностей кривых спектральной отражательной способности растительности и почв [2].

Физиологическое состояние растительности в значительной степени определяется содержанием хлорофилла и уровнем влагообеспеченности [3]. Определение абсолютных значений этих показателей по данным дистанционного зондирования в настоящее время затруднено и требует дополнительных наземных наблюдений. Поэтому целесообразным является использование относительных показателей состояния растительности, получаемых на основе спектральных индексов, тесно коррелирующих с уровнем обеспеченности растений хлорофиллом и влагой.

Одномоментные значения NDVI позволяют чётко отделять и анализировать растительные объекты от прочих природных объектов, тогда как идентификация и классификация разных типов растительности становится затруднительной и не является эффективной [4]. В связи с этим, в качестве основы для идентификации и картографирования растительных объектов решено использовать их различия в динамике NDVI в течение вегетационного периода.

Методы исследований

Расчёт большей части вегетационных индексов базируется на двух наиболее стабильных (не зависящих 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 (0,75–1,3 мкм) – максимальное отра-

жение энергии клеточной структурой листа. Поэтому высокий уровень фотосинтетической активности (связанный, как правило, с большой фитомассой растительности) проявляется в низких значениях коэффициента отражения в красной зоне спектра и высоких – в ближней инфракрасной. Отношение этих показателей друг к другу позволяет чётко отделять растительность от прочих природных объектов [5–7].

Использование же не простого отношения, а нормализованной разности между минимумом и максимумом отражений увеличивает точность измерения, позволяет уменьшить влияние таких явлений как различия в освещённости снимка, облачности, дымки, поглощение радиации атмосферой и других [8].

Наиболее популярный и часто используемый вегетационный индекс – NDVI (Normalized Difference Vegetation Index), который для растительности принимает положительные значения, и чем больше зелёная фитомасса, тем он выше [9]. Ему и было уделено основное внимание в нашем исследовании.

Уравнение для расчёта имеет следующий вид:

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

где NIR – отражение в ближней инфракрасной области спектра; RED – отражение в красной области спектра [10].

К особенностям предложенного в работе подхода относится оценка значений указанных спектральных индексов отдельно для сосновых, лиственных лесов и луговых фитоценозов [11]. Выбор данных природных объектов продиктован их различной чувствительностью к воздействию природных и антропогенных факторов среды [12].

Для анализа сезонной и многолетней динамики вегетационного индекса NDVI использовались многозональные космические снимки за 1988, 1994, 2002, 2005, 2009, 2010, 2015 и 2016 гг.

съёмки в 8-ми спектральных диапазонах с разрешением 30 м, полученные с аппаратов Landsat 5, 7. Снимки были сделаны в летне-осенний период (июнь – октябрь). Также в работе использовались снимки за август 2015 и июнь 2016 гг. в 11-ти спектральных диапазонах с разрешением 30 м, полученные с аппарата Landsat 8. При обработке снимков использовали компьютерную программу ENVI 5.2.

В качестве территории исследования была выбрана территория заповедника «Нургуш», расположенного в Котельничском районе Кировской области. Он создан для охраны пойменных комплексов реки Вятки: многочисленных озёр и хвойно-широколиственных лесов [13]. Исследования, проводимые на особо охраняемых природных территориях (ООПТ), направлены на инвентаризацию природных комплексов и их компонентов, экологический мониторинг, изучение естественной динамики биоценозов. Хвойные леса представлены ельниками, сосняками, пихтарниками; лиственные леса – липняками, березняками, осинниками, черноольшаниками, дубняками, тополевыми, вязовниками, ивняками. Практически повсеместно леса имеют густой подлесок и обильный подрост из липы. Лесопокрытая территория составляет 87,4% площади заповедника. Болота и заболоченные участки занимают 10% охранной зоны. Большую часть охранной зоны (90%) составляют сосновые леса.

Результаты и обсуждение

Процесс роста и созревания разных видов растений имеет свои особенности, связанные с различным распределением их зелёной массы во времени. Поэтому возможно разделение типов растительности на основе изучения зна-

чений вегетационных индексов в различные периоды вегетации. В связи с этим, в работе проведена оценка значений NDVI отдельно для сосновых, лиственных лесов и луговых фитоценозов.

При анализе сезонной динамики NDVI выявлено, что значения индекса выше в летние месяцы (июнь, август), чем в осенние (октябрь) (табл. 1).

Это может быть объяснено сезонной динамикой вегетационного индекса, так как растения в течение сезона проходят все фазы вегетации. Сроки прохождения фаз меняются в зависимости от метеоусловий данного года. По мере смены фаз вегетативного развития меняются состав и содержание пигментов в листьях растений, увеличивается биомасса, количество хлорофилла в зелёных листьях растений. По мере накопления хлорофилла понижается яркость растений в видимой части спектра, особенно в красной зоне и возрастает в инфракрасной [14]. Следовательно, значение NDVI возрастает (см. рис. 1 на цветной вкладке).

С разрушением хлорофилла в осенние месяцы наблюдается обратная картина – яркость в красной зоне возрастает, а в ближней инфракрасной уменьшается, что прослеживается при анализе снимка за 26 октября 2016 г. (рис. 2 на цветной вкладке).

Значения NDVI в октябре для лиственных смешанных лесов значительно ниже, чем в летние месяцы, а для прибрежной растительности – практически равны 0 (0–0,15). Уменьшение значений индекса связаны с усыханием растительности и, следовательно, низким содержанием хлорофилла в ней. Участки с отсутствием вегетации представлены у рек и озёр – отрицательные значения NDVI (-0,25–0).

Сравнение значений NDVI с учётом сезонной динамики развития растений выявляет

Таблица 1 / Table 1
Значения NDVI природных объектов на территории заповедника Нургуш в 2016 г.
NDVI values of natural objects in the territory of Nurgush Reserve in 2016

Класс объектов Class of objects	Значения индекса NDVI NDVI values		
	20.06	07.09	26.10
Водные объекты / Water objects	-0,25–0	-0,25–0	-0,35–0
Пляж, почва / Beach, soil	0–0,25	0–0,25	0–0,15
Хвойные леса / Coniferous forests	0,25–0,42	0,25–0,43	0,23–0,41
Смешанные леса / Mixed forests	0,42–0,48	0,43–0,50	0,15–0,21
Дубравы / Oak groves	0,48–0,57	0,5–0,57	0,08–0,15
Прибрежная растительность / Coastal vegetation	0,57–0,68	0,57–0,67	0–0,15

**Т. А. Адамович, Г. Я. Кантор,
Т. Я. Ашихмина, В. П. Савиных «Анализ сезонной и многолетней
динамики вегетационного индекса NDVI на территории
государственного природного заповедника «Нургуш»»**

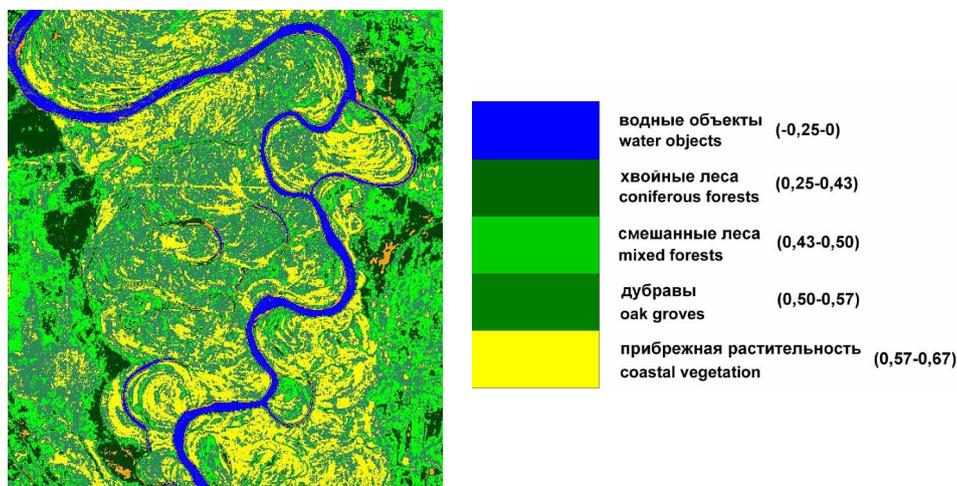


Рис. 1. Значения NDVI природных объектов на территории заповедника Нургуш 7 августа 2016 года

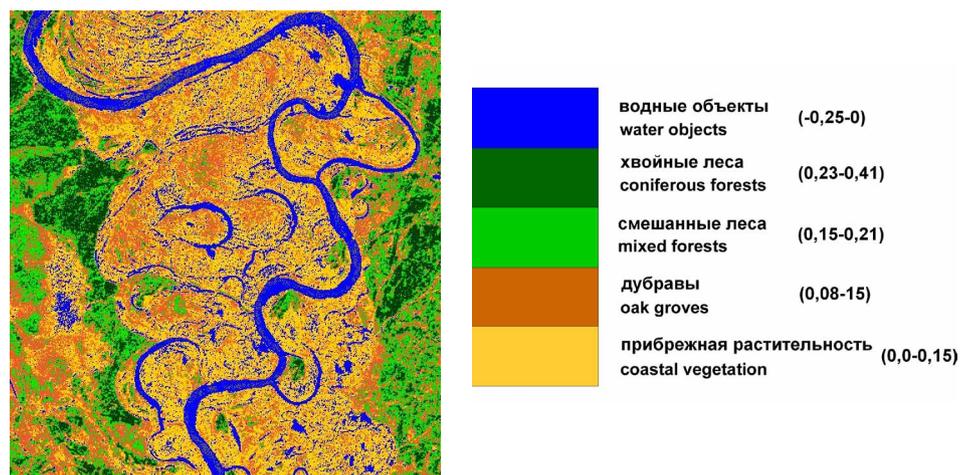


Рис. 2. Значения NDVI природных объектов на территории заповедника Нургуш 26 октября 2016 года

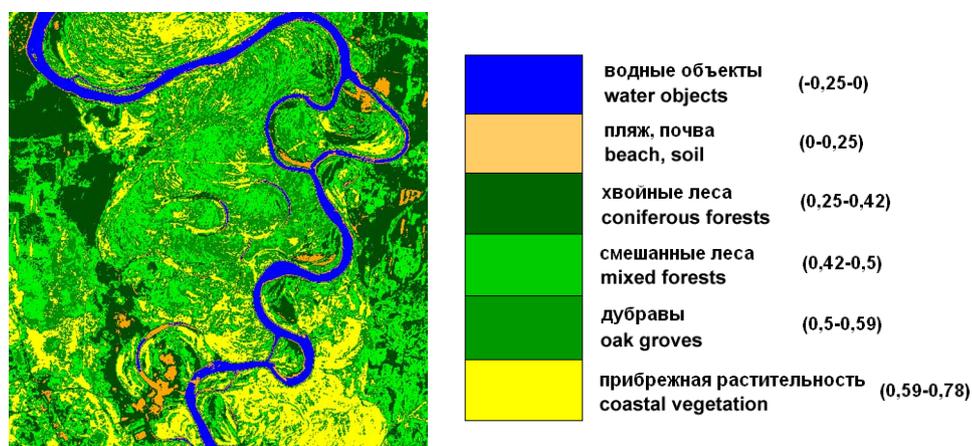


Рис. 3. Значения NDVI природных объектов на территории заповедника Нургуш 9 июля 1988 года

**Т. А. Адамович, Г. Я. Кантор,
Т. Я. Ашихмина, В. П. Савиных «Анализ сезонной и многолетней
динамики вегетационного индекса NDVI на территории
государственного природного заповедника «Нургуш»»**

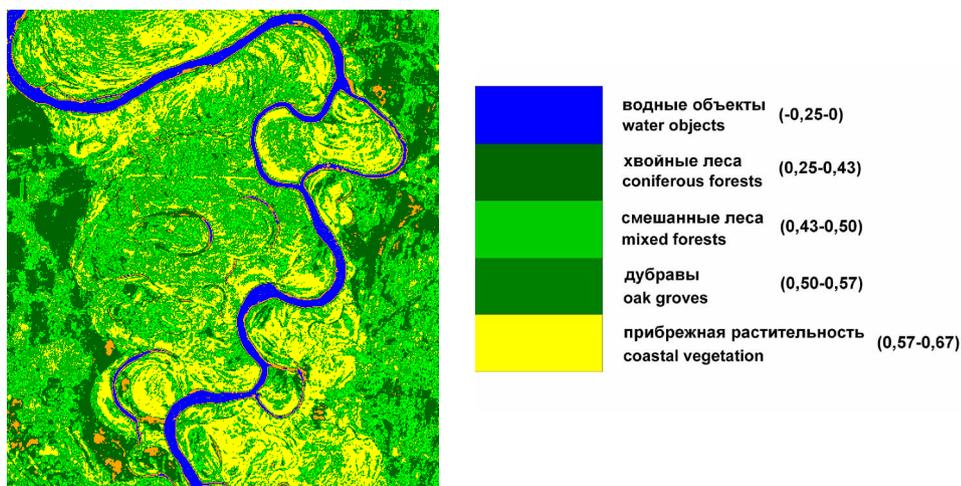


Рис. 4. Значения NDVI природных объектов на территории заповедника Нургуш 7 августа 2016 года

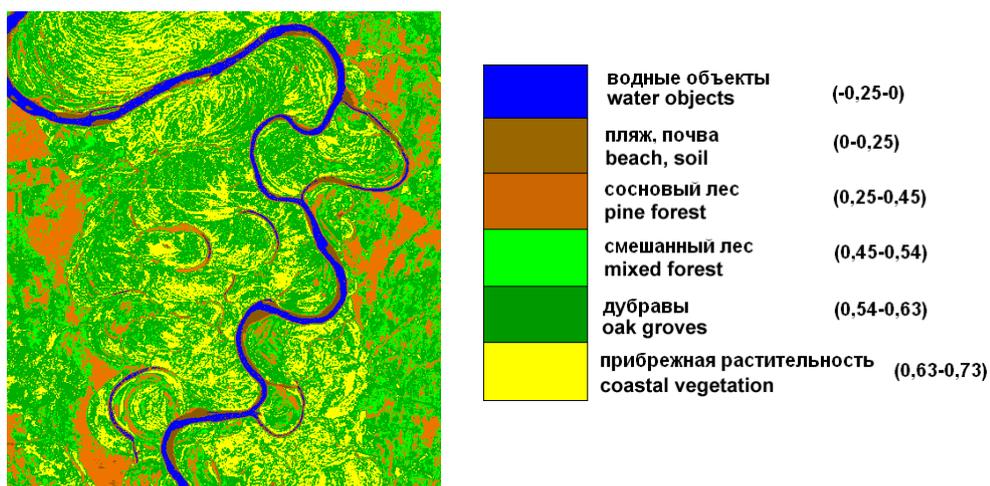


Рис. 5. Значения NDVI природных объектов на территории заповедника Нургуш 12 августа 2009 года

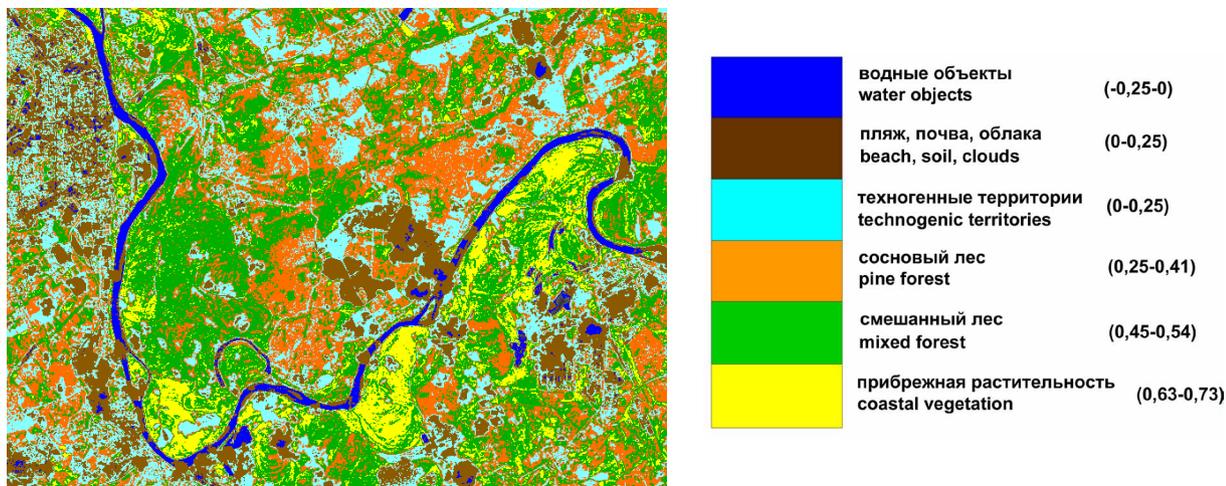


Рис. 6. Значения NDVI природных объектов на территории Киров–Кирово-Чепецкой промышленной агломерации 12 августа 2009 года

Таблица 2 / Table 2

Значения NDVI природных объектов на территории заповедника «Нургуш» в период с 1998 по 2016 гг. по данным Landsat 5, 7
 NDVI values for natural objects in the territory of Nurgush Reserve in the range 1998–2016 according to data of Landsat 5, 7

Класс объектов Class of objects	Значения индекса NDVI / NDVI values					
	1988 09.07	1994 18.07	2005 09.08	2010 07.08	2015 21.08	2016 07.08
Водные объекты / Water objects	-0,25–0	-0,25–0	-0,25–0	-0,25–0	-0,25–0,05	-0,25–0
Пляж, почва / Beach, soil	0–0,25	0–0,25	0–0,27	0–0,25	0,05–0,25	0–0,25
Хвойные леса / Coniferous forests	0,25–0,42	0,25–0,40	0,27–0,42	0,25–0,44	0,25–0,46	0,25–0,42
Смешанные леса / Mixed forests	0,42–0,5	0,40–0,43	0,42–0,48	0,44–0,48	0,46–0,48	0,42–0,5
Дубравы / Oak groves	0,5–0,59	0,43–0,52	0,48–0,54	0,48–0,53	0,48–0,53	0,5–0,56
Прибрежная растительность / Coastal vegetation	0,59–0,78	0,52–0,61	0,54–0,7	0,53–0,62	0,53–0,65	0,57–0,73

снижение индексов в октябре в сравнении с показателями в июне и августе, что можно объяснить снижением общего количества хлорофилла в конце вегетационного периода. Данный факт говорит о достоверности применяемых методов при анализе состояния растительности.

Кроме того, в работе приведена многолетняя динамика вегетационного индекса NDVI для всех классов выделенных объектов при анализе снимков за июль 1988 и 1994 гг.; а также август 2005, 2010, 2015 и 2016 гг. (табл. 2).

При анализе многолетней динамики NDVI установлено, что одинаковые значения индекса за период 28 лет характерны для водных объектов (-0,25–0), а также пляжей и почв (0–0,25). Для хвойных лесов значения NDVI также отличаются незначительно и находятся в интервале от 0,25 до 0,46.

При расчёте NDVI по снимкам за август 2005 и август 2015 гг. получены сопоставимые результаты: значения индекса колеблются в одном интервале для каждого класса изучаемых объектов. Анализ погодных условий за август в данные годы показал, что температура воздуха и количество выпавших осадков примерно одинаковы. Такая же тенденция наблюдается при анализе значений NDVI по космоснимкам за июль 1988 г. (рис. 3 на цветной вкладке) и август 2016 г.

Выявлены значительные различия в значениях NDVI для растительных объектов при анализе снимков за 18 июля 1994 г. и 7 августа

2010 г. по сравнению со значениями индекса за другие годы съёмки (рис. 4 на цветной вкладке). Низкие значения вегетационного индекса в июле 1994 г. для смешанных лесов и прибрежной растительности могут быть связаны с достаточно низкой среднемесячной температурой воздуха (14,2 °C) и небольшим количеством осадков. Достаточно низкие температуры для периода вегетации растений нарушают течение биохимических процессов в клетках, и тем самым могут вызывать в них необратимые изменения, приводящие к прекращению роста растений и даже их гибели [15]. Кроме того, температура оказывает большое влияние на жизнедеятельность почвенной микрофлоры, обуславливающей минеральное питание растений. Достаточно низкие значения NDVI в августе 2010 г., по сравнению с августом 2016 г. связаны с относительно засушливым и жарким летом 2010 г. Средняя температура в летний период 2010 года составила 24,7 °C. В жаркие засушливые периоды NDVI существенно снижается, что сопровождается уменьшением продуктивности фитоценозов и поглощённого растительностью излучения в красной области спектра [16]. Кроме того, на низкие значения вегетационного индекса в августе 2010 г. повлиял дефицит почвенной влаги.

Таким образом, общие особенности сезонной и многолетней динамики вегетационного индекса NDVI сохраняются на протяжении 28 лет, но среднемесячные значения существенно различаются в зависимости от соот-

Значения NDVI для хвойных лесов на территории заповедника «Нургуш» и вблизи городов Киров и Кирово-Чепецк / NDVI values for coniferous forests in the territory of Nurgush Reserve and near cities of Kirov and Kirovo-Chepetsk

Спутник / Satellite	Дата съёмки / Shooting date	«Нургуш» / Nurgush	Территория вблизи г. Киров и г. Кирово-Чепецк / Territory near cities of Kirov and Kirovo-Chepetsk
Landsat 4	09.07.1988	0,25–0,42	0,25–0,42
Landsat 7	01.08.2002	0,27–0,45	0,25–0,41
Landsat 5	12.08.2009	0,25–0,45	0,25–0,41
Landsat 7	21.08.2015	0,27–0,46	0,25–0,39

ношения агроклиматических факторов – температуры, осадков, относительной влажности.

Кроме того, в работе проведено сравнение значений NDVI для сосновых лесов, расположенных на территории заповедника «Нургуш», и сосновых лесов в центре Кировской области вблизи крупных городов Киров и Кирово-Чепецк. Город Киров является областным центром Кировской области. Промышленный комплекс города представлен предприятиями машиностроения, металлообработки, химической промышленности, лесопромышленного комплекса, теплоэнергетики. Киров является крупным автомобильным и железнодорожным узлом. Через город проходят железнодорожные пути, идущие на Нижний Новгород, Москву, Вологду, Санкт-Петербург, Пермь. На территории города Кирово-Чепецка функционирует более 60 лет Кирово-Чепецкий промышленный комплекс (КЧПК), в состав которого входят крупные предприятия по производству фторполимеров и минеральных удобрений.

Наиболее характерными направлениями негативного воздействия крупных промышленных предприятий на природные комплексы являются загрязнение воздушного бассейна выбросами промышленных котельных, загрязнение подземных и поверхностных водных объектов хозяйственно-бытовыми сточными водами предприятий, городов и посёлков, изъятие из землепользования и нарушение десятков тысяч гектаров земель при загрязнении их отходами производств. Кроме того, мощным источником загрязнения воздушной среды городов является автомобильный транспорт.

Загрязнение атмосферного воздуха негативно влияет на жизненное состояние древостоев, что выражается в разреженности крон, усыхании верхушек и ветвей, ослаблении

подроста. По литературным данным [17–19], сосна обыкновенная является одним из наиболее чувствительных индикаторов загрязнения воздушной среды. В связи с этим в работе сравнивается состояние сосновых лесов на заповедной территории и в центре Кировской области, где наиболее выражено техногенное воздействие на атмосферу. Результаты расчёта значений вегетационного индекса NDVI представлены в таблице 3.

Установлено, что сосновые леса, расположенные на территории Киро-Кирово-Чепецкой промышленной агломерации, имеют более низкие значения индекса по сравнению с аналогичными лесными массивами, расположенными на территории государственного природного заповедника «Нургуш» (рис. 5, 6 на цветной вкладке).

Так, значения вегетационного индекса по космическому снимку за 1 августа 2002 г. для хвойных лесов территории заповедника колеблются в интервале 0,27–0,45, на территории вблизи городов Киров и Кирово-Чепецк – в интервале 0,25–0,41. Хотя в июле 1988 г. значения NDVI для хвойных лесов на исследуемых территориях были примерно одинаковыми (0,25–0,42). Тенденция к снижению значений вегетационного индекса на территории вблизи крупных промышленных предприятий наблюдается при анализе снимков за август 2009 (0,25–0,41) и 2015 гг. (0,25–0,39).

Заключение

Результаты проведённых расчётов показывают, что использование вегетационного индекса NDVI позволяет проводить идентификацию и классификацию разных типов растительности по спутниковым изображениям, а также проследить сезонные изменения

Литература

в растительных сообществах. Установлено, что значения индекса лиственных фитоценозов выше в летние месяцы (июнь, август), чем в осенние (октябрь), что вполне объяснимо снижением общего количества хлорофиллов в конце вегетационного периода.

Проанализирована многолетняя динамика значений вегетационного индекса NDVI для растительных сообществ территории заповедника «Нургуш» в период 1988–2016 гг. При расчёте NDVI по снимкам за август 2005 и август 2015 гг. значения индекса колеблются в одном интервале для каждого класса изучаемых объектов, так как климатические условия (температура воздуха, количество выпавших осадков) в данные годы съёмки были примерно одинаковыми. Выявлены низкие значения NDVI для растительных объектов при анализе снимков за 18 июля 1994 г. и 7 августа 2010 г. по сравнению со значениями индекса за другие годы съёмки. Это связано с низкой среднемесячной температурой воздуха (14,2 °С) и небольшим количеством осадков в 1994 г. и относительно засушливым и жарким летом 2010 г. (средняя температура в летний период составила 24,7 °С).

Установлено, что сосновые леса, расположенные вблизи промышленных центров, имеют более низкие средние значения индекса NDVI (0,33) по сравнению с аналогичными лесными массивами, расположенными на территории заповедника «Нургуш» (0,36).

Результаты проведённых исследований показывают, что использование вегетационного индекса NDVI позволяет проводить идентификацию и классификацию разных типов растительности по спутниковым изображениям, а также проследить сезонные изменения в растительных сообществах. Общие особенности многолетней динамики вегетационного индекса NDVI сохраняются в течение ряда лет, но средние месячные значения существенно различаются в зависимости от соотношения агроклиматических факторов – температуры, осадков, относительной влажности.

Использование космических снимков даёт возможность значительно сократить выполнение наземных экспериментальных работ и оперативно проводить крупномасштабное картографирование особо охраняемых и природно-техногенных территорий.

Работа выполнена при поддержке гранта Президента Российской Федерации для государственной поддержки молодых учёных – кандидатов наук (МК-2120.2017.5).

1. Черепанов А.С. Вегетационные индексы: справочные материалы // Геоматика. 2011. № 2. С. 98–102.
2. Черепанов А.С., Дружинина Е.Г. Спектральные свойства растительности и вегетационные индексы // Геоматика. 2009. № 3. С. 28–32.
3. Леса Кировской области / Под ред. А.И. Видякина, Т.Я. Ашихминой, С.Д. Новосёлова. Киров: Кировская областная типография, 2008. 400 с.
4. Лиджиева Н.Ц., Уланова С.С., Федорова Н.Л. Опыт применения индекса вегетации (NDVI) для определения биологической продуктивности фитоценозов аридной зоны на примере региона Чёрные земли // Известия Саратовского университета. 2012. Т. 12. Сер. Химия. Биология. Экология. Вып. 2. С. 94–96.
5. 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 // In Proceedings of the 2nd Australian Conference on Agricultural Meteorology, Brisbane, Australia. 1996. P. 57–61.
6. 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.
7. 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.
8. Шовенгердт Р.А. Дистанционное зондирование. Модели и методы обработки изображений. М.: Техносфера, 2010. 560 с.
9. Rippen R.E. Calculating the vegetation index faster // Remote Sensing of Environment, 1990. V. 34. P. 71–73.
10. 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.
11. Cuevas-Gonzalez M., Gerard F., Balzter H., Riano D. Analysing forest recovery after wildfire disturbance in boreal Siberia using remotely sensed vegetation indices // Global Change Biology. 2009. No. 15. P. 561–577.
12. 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.
13. Тарасова Е.М., Кондрухова С.В., Целищева Л.Г. Государственный природный заповедник «Нургуш» // Теоретическая и прикладная экология. 2009. № 2. С. 90–97.
14. Epstein H.E., Walker D.A., Reynolds M.K., Kelley A.M., Jia G.J., Ping C.L., Michaelson G.J. Vegetation biomass, leaf area index, and NDVI patterns and relationships

along two latitudinal transects in arctic tundra // Abstract GC31A-0697, presented at AGU Fall Meeting, San Francisco, CA. 2009. V. 90. P. GC31A-0697.

15. Balaghi R., Tychon B., Eerens H., Jlibene M. Empirical regression models using NDVI, rainfall and temperature data for early prediction of wheat grain yields in Morocco // International Journal of Applied Earth Observation. 2008. No. 10. P. 438–452.

16. Лобанов Г.В., Зверева А.Ю., Коханько М.В., Хорина Е.В., Тришкин Б.В., Полякова А.В., Ужаккина А.П. Сезонная динамика спектральных характеристик пахотных угодий Брянской области // Вестник Брянского государственного университета. 2014. № 4. С. 112–117.

17. Шепяте Я., Вяцкус А. Методика оценки состояния хвойных лесов в процессе лесоустройства при локальном загрязнении среды // Лесное хозяйство. 1986. № 10. С. 47–49.

18. Токарева О.С., Касьянов И.В. Оценка динамики состояния растений биоиндикаторов атмосферного загрязнения на основе данных дистанционного зондирования Земли // Вестник науки Сибири. 2011. № 1 (1). С. 268–272.

19. Василевич М.И., Елсаков В.В., Щанов В.М. Применение спутниковых методов исследований в мониторинге состояния лесных фитоценозов в зоне выбросов промышленного предприятия // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2014. Т. 11. № 1. С. 30–42.

References

1. Cherepanov A.S. Vegetation indices: reference materials // Geomatika. 2011. No. 2. P. 98–102 (in Russian).

2. Cherepanov A.S., Druzhinina E.G. Spectral properties of vegetation and vegetative indices // Geomatika. 2009. No. 3. P. 28–32 (in Russian).

3. Forests of the Kirov region / Eds. A.I. Vidyakin, T.Ya. Ashikhmina, S.D. Novoselov. Kirov: Kirovskaya oblastnaya tipografiya, 2008. 400 p. (in Russian).

4. Lidzhiyeva N.Ts., Ulanova S.S., Fedorova N.L. Experience of using the vegetation index (NDVI) for determining the biological productivity of phytocenoses of the arid zone on the example of the Black Earth region // Izvestiya Saratovskogo universiteta. 2012. T. 12. Ser. Khimiya. Biologiya. Ekologiya. V. 2. P. 94–96 (in Russian).

5. 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 // In Proceedings of the 2nd Australian Conference on Agricultural Meteorology, Brisbane, Australia. 1996. P. 57–61.

6. 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.

7. 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.

8. Shovengerdt R.A. Remote sensing. Models and methods of image processing. Moskva: Tekhnosfera, 2010. 560 p. (in Russian).

9. Crippen R.E. Calculating the vegetation index faster // Remote Sensing of Environment, 1990. V. 34. P. 71–73.

10. 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.

11. Cuevas-Gonzalez M., Gerard F., Balzter H., Riano D. Analysing forest recovery after wildfire disturbance in boreal Siberia using remotely sensed vegetation indices // Global Change Biology. 2009. No. 15. P. 561–577.

12. 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) // Teoreticheskaya i prikladnaya ekologiya. 2017. No. 2. P. 9–18 (in Russian)

13. Tarasova E.M., Kondrukhova S.V., Tselishcheva L.G. The State natural reserve “Nurgush” // Teoreticheskaya i prikladnaya ekologiya. 2009. No. 2. P. 90–97 (in Russian).

14. Epstein H.E., Walker D.A., Raynolds M.K., Kelley A.M., Jia G.J., Ping C.L., Michaelson G.J. Vegetation biomass, leaf area index, and NDVI patterns and relationships along two latitudinal transects in arctic tundra // Abstract GC31A-0697, presented at AGU Fall Meeting, San Francisco, CA. 2009. V. 90. P. GC31A-0697.

15. Balaghi R., Tychon B., Eerens H., Jlibene M. Empirical regression models using NDVI, rainfall and temperature data for early prediction of wheat grain yields in Morocco // International Journal of Applied Earth Observation. 2008. No. 10. P. 438–452.

16. Lobanov G.V., Zvereva A.Yu., Kokhanko M.V., Khorina E.V., Trishkin B.V., Polyakova A.V., Uzhakina A.P. Seasonal dynamics of the spectral characteristics of arable land in the Bryansk Region // Vestnik Bryanskogo gosudarstvennogo universiteta, 2014. No. 4. P. 112–117 (in Russian).

17. Shepyatene Ya., Vyantskus A. Method for assessing the condition of coniferous forests during forest management in the presence of local contamination of the environment // Lesnoye khozyaystvo. 1986. No. 10. P. 47–49 (in Russian).

18. Tokareva O.S., Kasyanov I.V. Assessment of state dynamics of plants – bioindicators of atmospheric pollution based on remote sensing data // Vestnik nauki Sibiri. 2011. No. 1 (1). P. 268–272 (in Russian).

19. Vasilevich M.I., Elsakov V.V., Shchanov V.M. Application of satellite research methods in monitoring the state of forest phytocenoses in the zone of emissions of an industrial enterprise // Sovremennyye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa. 2014. V. 11. No. 1. P. 30–42 (in Russian).

Кинетическое исследование восстановления иоднитротетразолия хлорида суспензией в физиологическом растворе грамотрицательных бактерий *Pseudomonas aeruginosa* и *Escherichia coli*

© 2017. А. А. Калинина, к. х. н., доцент, А. С. Македошин, аспирант, Н. В. Гурский, магистрант, Т. Н. Соколова, д. х. н., профессор, В. Ф. Смирнов, д. б. н., профессор, Нижегородский государственный технический университет им. Р. Е. Алексеева, 603950, Россия, Нижний Новгород, ул. К. Минина, 24, e-mail: 777aleksa777_87@mail.ru

Соли тетразолия в последнее время активно используются для изучения жизнеспособности клеток микроорганизмов, в частности, для изучения состояния микробиологических сообществ при оценке негативных воздействий от различного рода загрязнений окружающей среды. В литературе описано использование для решения экологических задач системы мультисубстратного тестирования «Эколог», однако сами авторы отмечают, что система «Эколог» регистрирует отклик не всего микробного сообщества. В связи с этим, целью работы явился поиск дополнительного фактора использования солей тетразолия, а именно транспорт их в клетку. С использованием кинетических методов показана роль пассивной диффузии в восстановлении иоднитротетразолия клетками грамотрицательных бактерий *Pseudomonas aeruginosa* и *Escherichia coli*. Установлено, что восстановление иоднитротетразолия хлорида клеточными компонентами бактерий зависит от строения клеточной стенки бактерий и контролируется диффузией реагента в клетку.

Ключевые слова: соли тетразолия, формазаны, грамотрицательные бактерии, диффузия, кинетика.

Kinetic study of the reduction of iodonitrotetrazolium chloride by suspension of gram-negative bacteria *Pseudomonas aeruginosa* and *Escherichia coli* in a physiological solution

A. A. Kalinina, A. S. Makedoshin, N. V. Gurskiy, T. N. Sokolova, V. F. Smirnov, Nizhny Novgorod State Technical University n. a. R. E. Alekseev, Minina St., 24, Nizhny Novgorod, Russia, 603950, e-mail: 777aleksa777_87@mail.ru

Tetrazolium salts have recently been actively used to study the viability of microorganism cells, in particular to study the state of microbiological communities in assessing the negative effects of various kinds of pollution of the environment. The literature describes the use of the multisubstrate testing system (MTS) "Ecolog" for the solution of environmental problems. It is based on triphenyltetrazolium bromide, which has proven itself in assessing the negative consequences in the environment due to industrial and domestic pollution. In environmental studies, the viability of microorganisms and their communities is estimated in terms of the intensity of the restoration of tetrazolium salts, but the authors themselves note that MTS "Ecolog" does not register the response of the entire microbial community. In connection with this, the purpose of the work was to search for an additional factor for the use of tetrazolium salts, namely, transport them into the cell. The identification of the role of diffusion in the cellular formation of formazanes plays an important role in increasing the objectivity of research results, including ecological ones, with the participation of tetrazolium salts.

Using the kinetic methods, the role of passive diffusion in the reduction of iodonitrotetrazolium (INT) by cells of gram-negative bacteria *Pseudomonas aeruginosa* and *Escherichia coli* is shown. Applying the integral method of determining the general order, it is found that the reduction of INT by cell components of bacteria *Ps. aeruginosa*, suspended in physiological solution, is satisfactorily described by linear anamorphosis of the first order kinetics. It has been established that the reduction of iodonitrotetrazolium chloride by the cellular components of bacteria depends on the structure and chemical composition of the cell wall and biomembranes of bacteria and is controlled by the diffusion of the reagent into the cell. The linear dependence of the initial rate of reduction of INT from its initial concentration was revealed, which for biological objects involving cells is a sign of passive diffusion. A low temperature sensitivity of the reduction reaction of the INT is detected in the temperature range, which does not significantly exceed the optimum temperature for *Ps. aeruginosa* of 37 °C.

Keywords: tetrazolium salts, formazans, gram-negative bacteria, diffusion, kinetics.

Соли тетразолия широко применяют в научных исследованиях и практических целях в различных областях – гистологии, цитологии, биохимии, экофизиологии, экотоксикологии, океанологии, почвоведении, микробиологическом контроле воды и др. [1–9]. Их использование основано на способности к восстановлению с раскрытием цикла и образованием окрашенных продуктов – формазанов. Однозначно доказано, что донорами электронов являются клеточные компоненты – аэробные дегидрогеназы мембранной локализации, а также промежуточные переносчики электронов гидрохиноновой природы дыхательной цепи клеток [10–12]. На этом основании соли тетразолия используются как индикаторы дыхательной активности. В частности, в отдельных работах количество потреблённого клетками бактерий кислорода на 1 моль восстановленной соли тетразолия использовалось для оценки эффективности электронного транспорта в дыхательной цепи клетки [13].

В экологических исследованиях через интенсивность восстановления солей тетразолия оценивается в целом жизнеспособность микроорганизмов и их сообществ. Специально для решения экологических задач была разработана мультисубстратная тест-система (МСТ) «Эколог» на основе трифенилтетразолия бромида, которая хорошо зарекомендовала себя при оценке негативных последствий в окружающей среде вследствие промышленных и бытовых загрязнений [14–19], при анализе активного ила и других микробиологических сообществ [4], при выявлении воздействия обрастания микроорганизмами на металлоконструкции и корпуса судов [1, 6] и др.

Однако в МСТ «Эколог» регистрируется отклик не всего микробного сообщества, а только её части, которая активно способна восстанавливать используемую соль тетразолия. Об ограниченных возможностях солей тетразолия как объективных неселективных индикаторов жизнеспособности бактериальных клеток указывалось неоднократно, в том числе и разработчиками метода МСТ [20, 21] и более ранней тест-системы «Biolog» [4, 21, 22]. В связи с чем встаёт проблема выяснения причин столь широкого диапазона восстановительной способности микроорганизмов по отношению к солям тетразолия.

Известно, что сродство солей тетразолия к клетке зависит как от электростатического взаимодействия катиона тетразолия с отрицательно заряженными группами химических компонентов биомембран, так и Ван-дер-

Ваальсовыми взаимодействиями [11, 12, 23], а повреждения биомембран усиливают сродство [11]. Эти исследования могут свидетельствовать о том, что именно транспорт солей тетразолия в клетку может быть лимитирующим фактором в восстановлении. К настоящему времени имеются лишь единичные работы по исследованию диффузии солей тетразолия в клетки микроорганизмов [1, 24, 25]. Вместе с тем, выявление роли диффузии в клеточном образовании формазанов играет важную роль в повышении объективности результатов исследований, в том числе экологических, при участии солей тетразолия.

В связи с чем, целью работы явилось выявление кинетическими методами роли диффузии в восстановлении клетками бактерий иоднитротетразолия хлорида как индикатора жизнеспособности клеток.

Объекты и методы

В качестве индикатора использовалась соль иоднитротетразолия хлорид (ИНТ, 95%, Aldrich). Основными критериями при выборе данной соли были: способность к восстановлению без образования промежуточных полупродуктов; хорошее сродство к клеткам бактерий и, главное, возможность количественного выделения из клеток методом экстракции продукта восстановления.

В качестве тест-культур использовали грамотрицательные бактерии *Pseudomonas aeruginosa* (источник – почва г. Н. Новгород) и *Escherichia coli* (препарат «БИФИКОЛ», ФГБУЗ «Нижегородское предприятие по производству бактериальных препаратов «ИмБио») и *E. coli* (источник – почва г. Н. Новгород).

Методика проведения кинетического эксперимента. Смыв суточной бактериальной культуры со скошенного мясо-пептонного агара физиологическим раствором (0,9% водный раствор хлорида натрия) доводили до оптической плотности $1,00 \pm 0,05$ (670 нм). К 32 мл бактериальной суспензии в стерильных условиях добавляли аликвоту 1,0 мМ водного раствора соли иоднитротетразолия в соответствии с начальной концентрацией и смесь выдерживали в термостате при температуре эксперимента (оптимальной 37 °С; в опытах по выявлению температурной зависимости – 33 °С и 41 °С). Для разрушения клеточной стенки, с целью повышения степени извлечения продукта восстановления, по истечении определённого времени 5 мл анализируемой смеси отбирали в пробирку, содержащую 0,2 мл раствора ли-

зоцима (концентрация 0,2 мг/л). Через 30 с смесь экстрагировали этилацетатом, сушили хлоридом кальция, после фильтрования анализировали спектрофотометрически при длине волны 490 нм, характерной для продукта восстановления – иодмоноформаза (ИМФ). Коэффициент экстинкции определяли по экспериментальной зависимости оптической плотности в спектре поглощения от концентрации ИМФ. Его величина, равная $1,9 \cdot 10^4 \text{ л} \cdot \text{моль}^{-1} \cdot \text{см}^{-1}$, согласуется с литературными данными [26].

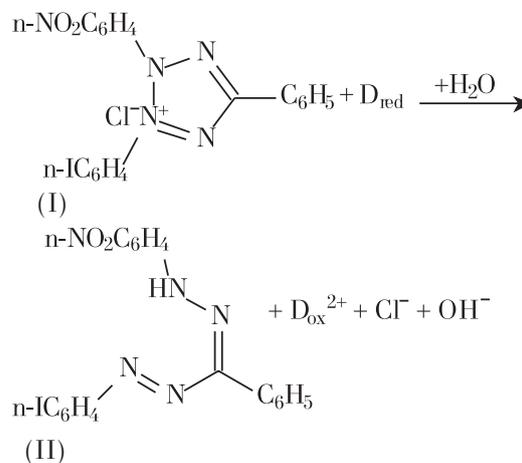
Текущие концентрации ИМФ определяли по результатам 5–6 независимых экспериментов, среднеквадратичная ошибка определения 10–15%.

Иоднитротетразолий (95%, Aldrich), иодмоноформаза (crystalline, Sigma), лизоцим (препарат «Лизобакт» Bosnalijek) использовали в виде коммерческих препаратов.

Спектры регистрировали на спектрофотометре «2802 UV/Vis Unicо». Инкубацию культур бактерий и соответствующие исследования с применением этих культур проводили в термостате марки «ТС-1/80 СПУ».

Результаты исследований и их обсуждение

Восстановление ИНТ протекает по реакции [26]:



Здесь D – донор электронов биогенной природы соответственно в восстановленной (D_{red}) и окисленной (D_{ox}) формах.

В работе [27] показано, что кинетическая кривая накопления ИМФ при участии бактерий *Ps. aeruginosa* (музейный штамм, г. Пущино) имеет S-образный вид с явно обозначенным индукционным периодом. Характер кинетической кривой при использовании в настоящем исследовании бактерий *Ps. aeruginosa* не противоречит данным работы [27], однако, индукционный период оказался по времени короче, а степень конверсии за этот период не превысила $\approx 0,5\%$ (рис. 1).

При использовании шкалы времени, удобной для представления высоких степеней кон-

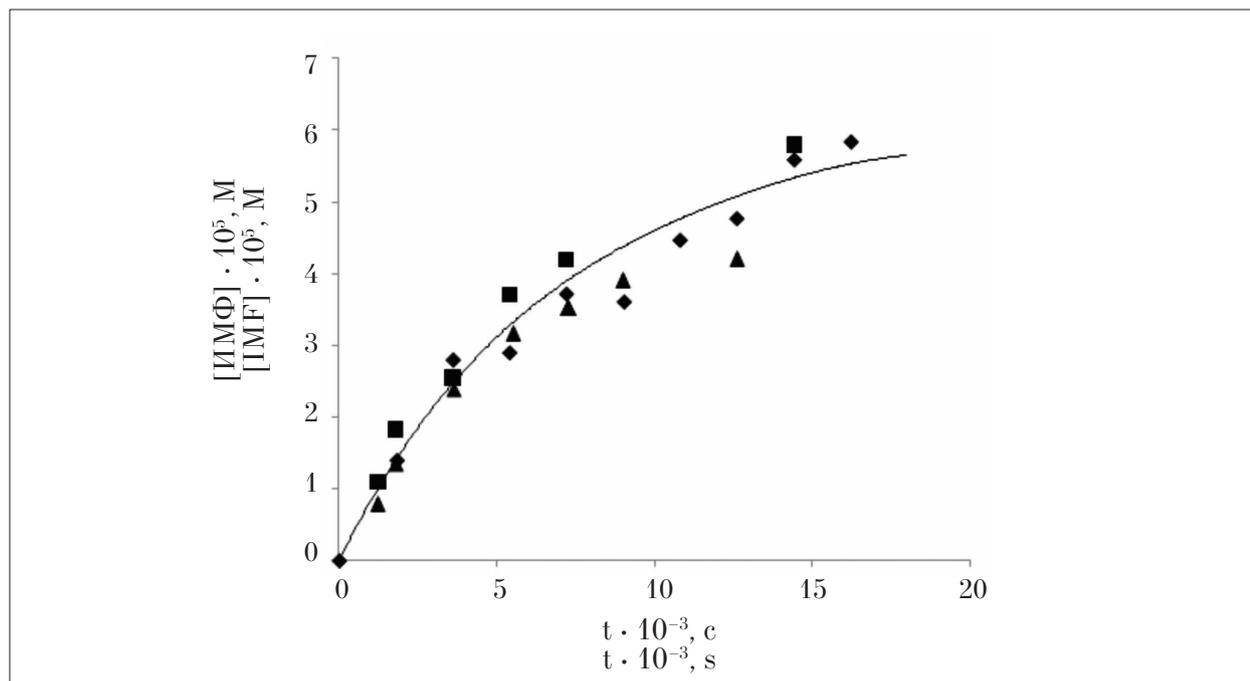


Рис. 1. Кинетическая кривая накопления иодмоноформаза (ИМФ) под воздействием *Ps. aeruginosa* ($[\text{ИНТ}]_0 = 10,0 \cdot 10^{-5} \text{ моль/л}$; $t = 37^\circ\text{C}$ (◆), $t = 33^\circ\text{C}$ (▲), $t = 41^\circ\text{C}$ (■) / Fig. 1. Kinetic curve of accumulation of iodomonoformazan (IMF) under the influence of *Ps. aeruginosa* ($[\text{INT}]_0 = 10.0 \cdot 10^{-5} \text{ mol/L}$; $t = 37^\circ\text{C}$ (◆), $t = 33^\circ\text{C}$ (▲), $t = 41^\circ\text{C}$ (■))

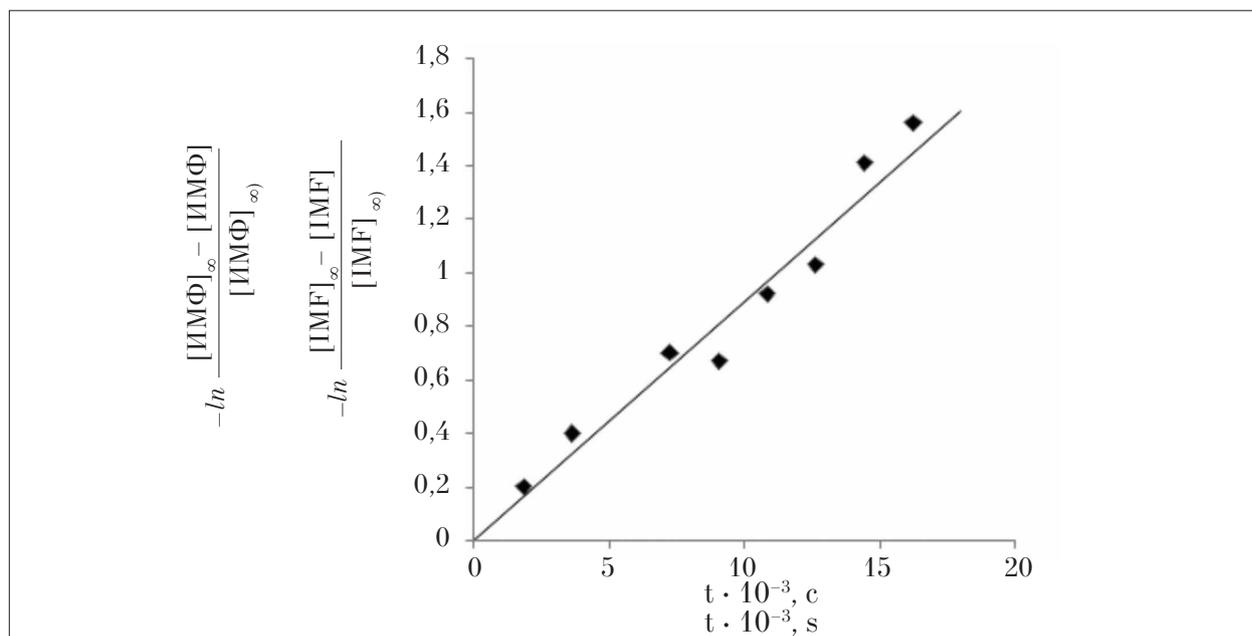


Рис. 2. Анаморфоза кинетики первого порядка реакции восстановления ИНТ клеточными компонентами бактерий *Ps. aeruginosa* ($[ИНТ]_0 = 10,0 \cdot 10^{-5}$ моль/л; $[ИМФ]_{\infty} = 7,4 \cdot 10^{-5}$ моль/л; $t = 37$ °С, $y = 8,9 \cdot 10^{-5}x$)
Fig. 2. Anamorphosis of the first-order kinetics of the reaction of the reduction of INT by cellular components of bacteria *Ps. aeruginosa* ($[ИНТ]_0 = 10,0 \cdot 10^{-5}$ моль/л; $[ИМФ]_{\infty} = 7,4 \cdot 10^{-5}$ mol/L; $t = 37$ °С, $y = 8,9 \cdot 10^{-5}x$)

версии (до 70%), кинетическая кривая имеет вид монотонно возрастающей зависимости, на которой индукционный период нивелируется (рис. 1).

Применяя интегральный метод определения общего порядка, найдено, что восстановление ИНТ клеточными компонентами бактерий *Ps. aeruginosa*, суспензированных в физиологическом растворе, удовлетворительно описывается линейной анаморфозой кинетики первого порядка (рис. 2):

$$\ln \frac{[ИНТ] - [ИНТ]_{\infty}}{([ИНТ]_0 - [ИНТ]_{\infty})} = -kt$$

или

$$\ln \frac{[ИМФ]_{\infty} - [ИМФ]}{[ИМФ]_{\infty}}$$

Константа скорости, определённая по угловому коэффициенту анаморфозы кинетики первого порядка, равна $8,90 \cdot 10^{-5} \text{ с}^{-1}$.

Среднее значение $k_{\text{эф}}$ по результатам шести независимых экспериментов составляет $(8,58 \pm 0,89) \cdot 10^{-5} \text{ с}^{-1}$.

В температурном диапазоне, который существенно не выходит за пределы оптимальной температуры для *Ps. aeruginosa*, равной 37 °С, обнаружена низкая температурная

чувствительность реакции восстановления ИНТ (рис. 1). Необычайно малое значение предэкспоненциального множителя уравнения Аррениуса ($E_a \approx 0$ кДж, $A \approx k_{\text{эф}}$) не типично для химического взаимодействия и определяет диффузионный контроль реакции.

Таким образом, можно предположить, что соль тетразолия медленно диффундирует через липопротеиновую и плазматическую мембраны грамотрицательной бактерии *Ps. aeruginosa* к клеточным сайтам восстановления.

Когда время не является координатой реакции, выполняется первый закон Фика, и можно предположить, что начальная скорость восстановления коррелирует со скоростью диффузии ИНТ в клетку. Как видно из рисунка 3, в координатах $V_0 = f([ИНТ]_0)$ при температуре, равной 37 °С удовлетворительно выполняется линейная зависимость, что согласуется с механизмом пассивной диффузии в биологических системах [28].

Таким образом, в восстановлении ИНТ, вероятно, и других солей тетразолия, важна не столько клеточная организация электронного транспорта в дыхательной цепи, сколько строение и химический состав клеточной стенки и биомембраны бактерий.

В этом отношении показательными оказались исследования восстановления ИНТ

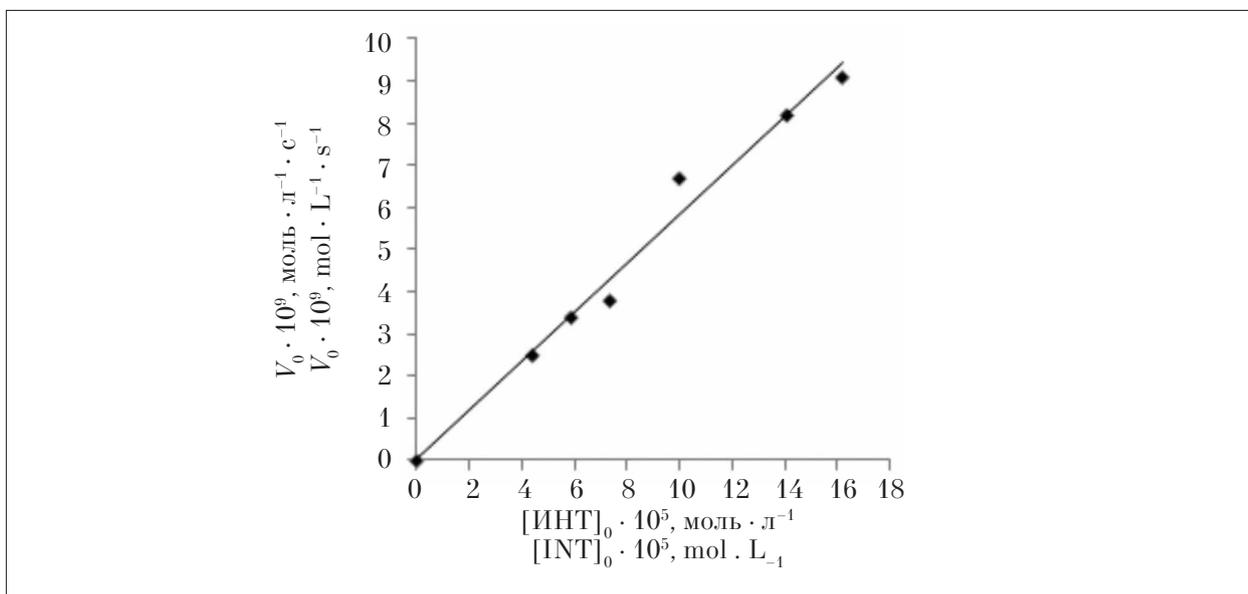


Рис. 3. Зависимость начальной скорости восстановления ИНТ под воздействием *Ps. aeruginosa* от начальной концентрации реагента
Fig. 3. Dependence of the initial rate of reduction of INT under the influence of *Ps. aeruginosa* on the initial concentration of reagent

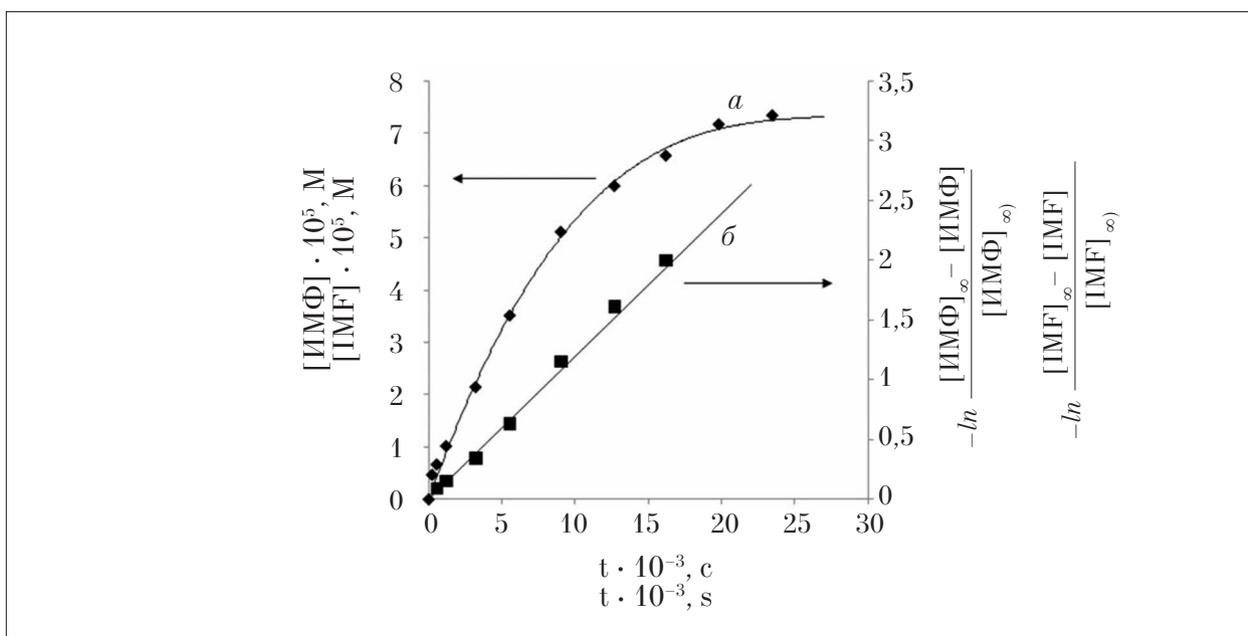


Рис. 4. Кинетическая кривая накопления иодмоноформазана под воздействием *E. coli* (а) и её анаморфоза в координатах (б) ($[\text{ИНТ}]_0 = 1,0 \cdot 10^{-4}$ моль/л; $[\text{ИМФ}]_\infty = 7,6 \cdot 10^{-5}$ моль/л; $t = 37^\circ\text{C}$, $y = 1,2 \cdot 10^{-4}x$)
Fig. 4. Kinetic curve of accumulation of iodomonoforazan under the influence of *E. coli* (а) and its anamorphosis in coordinates (б) ($[\text{ИНТ}]_0 = 1,0 \cdot 10^{-4}$ моль/л; $[\text{ИМФ}]_\infty = 7,6 \cdot 10^{-5}$ mol/L; $t = 37^\circ\text{C}$, $y = 1,2 \cdot 10^{-4}x$)

бактериями *E. coli*. В одной серии опытов использовали бактерии, выделенные из препарата «Бификол» (ФГБУЗ «Нижегородское предприятие по производству бактериальных препаратов «ИмБио»), в котором бактерии подвергались лиофилизации, вследствие чего возможны изменения проницаемости

липопротеиновой и плазматической мембран. Получены положительные результаты, представленные на рисунке 4.

Константа скорости, определённая по тангенсу угла наклона линейной анаморфозы кинетики первого порядка, равна $11,94 \cdot 10^{-5} \text{ с}^{-1}$ (рис. 4б).

Ранее восстановление ИНТ штаммом *E. coli* К-12 было изучено в работе [29], где также выявлена восстановительная способность ИНТ и показано влияние на процесс ингибиторов и разобщителей электронного транспорта. При использовании нами в качестве тест-культуры *E. coli* (источник – почва г. Нижнего Новгорода) восстановления ИНТ не наблюдалось на протяжении 6–8 часов экспозиции.

Очевидно, что даже в рамках одного вида грамотрицательных бактерий, вследствие отличительных особенностей в структурной организации липопротеиновой мембраны возможен широкий диапазон восстановительной способности к солям тетразолия.

Заключение

Таким образом, при использовании кинетических методов показано, что восстановление ИНТ клетками бактерий удовлетворительно описывается линейными анаморфозами реакции первого порядка, что позволяет количественно через эффективные константы скорости реакции определить восстановительную активность бактерий по отношению к ИНТ. Выявлена линейная зависимость начальной скорости восстановления ИНТ от его начальной концентрации, что для биологических объектов с участием клеток является признаком пассивной диффузии. Невыполнение уравнения Аррениуса в температурном интервале, благоприятном для жизнедеятельности бактерий *Ps. aeruginosa*, подтверждает диффузионный контроль восстановления соли тетразолия.

Выявлено, что отклик на индикатор – соль тетразолия, у грамотрицательных бактерий зависит от особенностей строения и химического состава клеточной стенки, что может оказывать влияние на объективность результатов экологического исследования с использованием солей тетразолия.

Литература

1. Sabaeifard P., Abdi-Ali A., Reza Soudi M., Dinarvand K. Optimization of tetrazolium salt assay for *Pseudomonas aeruginosa* biofilm using microtiter plate method // *Journal of Microbiological Methods*. 2014. V. 105. P. 134–140.
2. Yang Q., Wang X., Shen Y. Comparison of soil microbial community catabolic diversity between rhizosphere and bulk soil induced by tillage or residue retention // *Journal of Soil Science and Plant Nutrition*. 2013. V. 13. No. 1. P. 187–199.

3. Mondini C., Insam H. Community level physiological profiling as a tool to evaluate compost maturity: a kinetic approach // *European Journal of Soil Biology*. 2003. V. 39. No. 3. P. 141–148.
4. Gryta A., Fraç M., Oszust K. The application of the Biolog EcoPlate approach in ecotoxicological evaluation of dairy sewage sludge // *Applied Biochemistry and Biotechnology*. 2014. V. 174. No. 4. P. 1434–1443.
5. Siciliano S.D., Thereot C.M., de Freitas J.R., Hucl P.J., Germida J.J. Differences in the microbial communities associated with the rots of different cultivars of canola and wheat // *Canadian Journal of Microbiology*. 1998. V. 44. No. 9. P. 844–851.
6. Grayston S.J., Wang S.Q., Campbell C.D., Edwards A.C. Selective influence of plant species on microbial diversity in the rhizosphere // *Soil Biology and Biochemistry*. 1998. V. 30. No. 3. P. 369–378.
7. Campbell C.D., Grayston S.J., Hirst D.J. Use of rhizosphere carbon sources in sole carbon source tests to discriminate soil microbial communities // *Journal of Microbiological Methods*. 1997. V. 30. No. 1. P. 33–41.
8. Фокина А.И., Домрачева Л.И., Зыкова Ю.Н., Скугорева С.Г., Лялина Е.И., Трефилова Л.В. Совершенствование тетразольно-топографического метода биотестирования с использованием цианобактерий // *Теоретическая и прикладная экология*. 2017. № 1. С. 31–41.
9. 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 загрязненных средах // *Теоретическая и прикладная экология*. 2008. № 2. С. 23–28.
10. Thorm S.M., Horobin R.W., Seidler E., Barer M.R. Factors affecting the selection and use of tetrazolium salts as cytochemical indicators of microbial viability and activity // *Journal of Applied Bacteriology*. 1993. V. 74. No. 4. P. 433–443.
11. Pearse A.G., Hess R. Substantivity and other factors responsible for formazan patterns in dehydrogenase histochemistry // *Experientia (Basel)*. 1961. V. 17. P. 136–141.
12. Kalina M., Plapinger R.E., Hoshino Y., Seligman A.M. Nonosmiophilic tetrazolium salts that yield osmiophilic, lipophobic formazans for ultrastructural localization of dehydrogenase activity // *Journal of Histochemistry and Cytochemistry*. 1972. V. 20. No. 9. P. 685–695.
13. Raap A.K. Studies on the phenazine methosulphate-tetrazolium salt capture reaction in NAD(P)⁺-dependent dehydrogenase cytochemistry. III. The role of superoxide in tetrazolium reduction // *Histochemistry*. 1983. V. 15. P. 977–986.
14. Горленко М.В., Кожевин П.А. Мультисубстратное тестирование природных микробных сообществ. М.: МАКС Пресс, 2005. 88 с.
15. Горленко М.В., Терехов А.С., Марченко С.А., Марченко А.И., Воробьев А.В., Кожевин П.А. Индикация

загрязнения почвы полициклическими ароматическими углеводородами по функциональной реакции почвенного микробного комплекса // Вестник Московского университета. Серия 17. Почвоведение. 2003. Т. 1. С. 46–49.

16. Семенова И.Н., Ильбулова Г.Р., Суюндуков Я.Т. Функциональная активность микробных сообществ черноземов Башкирского Зауралья в условиях техногенного загрязнения // Поволжский экологический журнал. 2012. Т. 3. С. 311–318.

17. Yakushev A.V., Byzov B.A. Microbiological characterization of vermicomposts by the method of multisubstrate testing // Pochvovedenie. 2008. V. 11. P. 1381–1387 (in Russian).

18. Горленко М.В., Якименко О.С., Голиченков М.В., Костина Н.В. Функциональное биоразнообразие почвенных микробных сообществ при внесении органических субстратов различной природы // Вестник Московского университета. Серия 17. Почвоведение. 2012. Т. 2. С. 20–27.

19. Blagodatskaya E., Kuzyakov Y. Active microorganisms in soil: Critical review of estimation criteria and approaches // Soil Biology and Biochemistry. 2013. V. 67. P. 192–211.

20. Preston-Mafham J., Boddy L., Randerson P.F. Analysis of microbial functional diversity using sole-carbon-source utilization profiles – a critique // FEMS Microbiology Ecology. 2002. V. 42. P. 1–14.

21. Круглов Ю.В. Микробное сообщество почвы: физиологическое разнообразие и методы исследования // Сельскохозяйственная биология. 2016. Т. 51. № 1. С. 46–59.

22. Smolla K., Wachtendorf U., Heuer H., Li W.T., Forney L. Analysis of BIOLOG GN substrate utilization patterns by microbial communities // Applied and Environmental Microbiology. 1998. V. 64. P. 1220–1225.

23. Horobin R.W. Selection of optimum tetrazolium salts for use in histochemistry: the value of structurestaining correlations // The Histochemical Journal. 1982. V. 14. No. 2. P. 301–310.

24. Rodriguez G.G. Use of a fluorescent redox probe for direct visualization of actively respiring bacteria // Applied Environmental Microbiology. 1992. V. 58. No. 6. P. 1804–1808.

25. Seidler E. The tetrazolium-fonnazan system: design and histochemistry. New York: G. Fischer. Stuttgart. 1991. 79 p.

26. Радостин С.Ю., Калинина А.А., Македошин А.С., Соколова Т.Н., Кузина О.В., Карташов В.Р. Восстановление иоднитротетразолия клетками бактерий как метод оценки их коррозионной активности // Коррозия: материалы, защита. 2015. № 11. С. 45–48.

27. Ленгелер Й., Древе Г., Шлегель У. Современная микробиология: Прокариоты. В 2 т. М.: Мир. 2005. 654 с., 496 с.

28. Smith J.J., McFeters G.A. Mechanisms of INT (2-(4-iodophenyl)-3-(4-nitrophenyl)-5-phenyl tetrazo-

lium chloride), and CTC (5-cyano-2,3-ditoly tetrazolium chloride) reduction in *Escherichia coli* K-12 // Journal of Microbiological Methods. 1997. V. 29. No. 3. P. 161–175.

References

1. Sabaeifard P., Abdi-Ali A., Reza Soudi M., Dinarnvand K. Optimization of tetrazolium salt assay for *Pseudomonas aeruginosa* biofilm using microtiter plate method // Journal of Microbiological Methods. 2014. V. 105. P. 134–140.

2. Yang Q., Wang X., Shen Y. Comparison of soil microbial community catabolic diversity between rhizosphere and bulk soil induced by tillage or residue retention // Journal of Soil Science and Plant Nutrition. 2013. V. 13. No. 1. P. 187–199.

3. Mondini C., Insam H. Community level physiological profiling as a tool to evaluate compost maturity: a kinetic approach // European Journal of Soil Biology. 2003. V. 39. No. 3. P. 141–148.

4. Gryta A., Fraç M., Oszust K. The application of the Biolog EcoPlate approach in ecotoxicological evaluation of dairy sewage sludge // Applied Biochemistry and Biotechnology. 2014. V. 174. No. 4. P. 1434–1443.

5. Siciliano S.D., Thereot C.M., de Freitas J.R., Hucl P.J., Germida J.J. Differences in the microbial communities associated with the rots of different cultivars of canola and wheat // Canadian Journal of Microbiology. 1998. V. 44. No. 9. P. 844–851.

6. Grayston S.J., Wang S.Q., Campbell C.D., Edwards A.C. Selective influence of plant species on microbial diversity in the rhizosphere // Soil Biology and Biochemistry. 1998. V. 30. No. 3. P. 369–378.

7. Campbell C.D., Grayston S.J., Hirst D.J. Use of rhizosphere carbon sources in sole carbon source tests to discriminate soil microbial communities // Journal of Microbiological Methods. 1997. V. 30. No. 1. P. 33–41.

8. Fokina A.I., Domracheva L.I., Zykova Yu.N., Skugoreva S.G., Lyalina E.I., Trefilova L.V. Improving tetrazol-topographic method of biotesting using cyanobacteria // Teoreticheskaya i prikladnaya ekologiya. 2017. No. 1. P. 31–41 (in Russian).

9. Domracheva L.I., Kondakova L.V., Ashikhmina T.Ya., Ogorodnikova S.Yu., Olkova A.S., Fokina A.I. Application of tetrazole-topographic method in defining dehydrogenizing activity of cyanobacteria in polluted environments // Teoreticheskaya i prikladnaya ekologiya. 2008. No. 2. P. 23–28 (in Russian).

10. Thorm S.M., Horobin R.W., Seidler E., Barer M.R. Factors affecting the selection and use of tetrazolium salts as cytochemical indicators of microbial viability and activity // Journal of Applied Bacteriology. 1993. V. 74. No. 4. P. 433–443.

11. Pearse A.G., Hess R. Substantivity and other factors responsible for formazan patterns in dehydrogenase histochemistry // Experientia (Basel). 1961. V. 17. P. 136–141.

12. Kalina M., Plapinger R.E., Hoshino Y., Seligman A.M. Nonosmiophilic tetrazolium salts that yield osmiophilic, lipophobic formazans for ultrastructural localization of dehydrogenase activity // *Journal of Histochemistry and Cytochemistry*. 1972. V. 20. No. 9. P. 685–695.
13. Raap A.K. Studies on the phenazine methosulphate-tetrazolium salt capture reaction in NAD(P)⁺-dependent dehydrogenase cytochemistry. III. The role of superoxide in tetrazolium reduction // *Histochemistry*. 1983. V. 15. P. 977–986.
14. Gorlenko M.V., Kozhevnikov P.A. Multisubstrate testing of natural microbial communities. Moskva: MAKS Press, 2005. 88 p. (in Russian).
15. Gorlenko M.V., Terekhov A.S., Marchenko S.A., Marchenko A.I., Vorob'ev A.V., Kozhevnikov P.A. Indication of soil pollution by polycyclic aromatic hydrocarbons according to the functional reaction of the soil microbial complex // *Vestnik Moskovskogo universiteta. Seriya 17. Pochvovedenie*. 2003. V. 1. P. 46–49 (in Russian).
16. Semenova I.N., Il'bulova G.R., Suyundukov Ya.T. Functional activity of microbial communities of chernozems of the Bashkirian TransUral region under technogenic pollution // *Povolzhskiy ekologicheskiy zhurnal*. 2012. V. 3. P. 311–318 (in Russian).
17. Yakushev A.V., Byzov B.A. Microbiological characterization of vermicomposts by the method of multisubstrate testing // *Pochvovedenie*. 2008. V. 11. P. 1381–1387 (in Russian).
18. Gorlenko M.V., Yakimenko O.S., Golichenkov M.V., Kostina N.V. Functional biodiversity of soil microbial community structure influenced by organic substrates of various nature // *Vestnik Moskovskogo universiteta. Seriya 17. Pochvovedenie*. 2012. V. 2. P. 20–27 (in Russian).
19. Blagodatskaya E., Kuzyakov Y. Active microorganisms in soil: Critical review of estimation criteria and approaches // *Soil Biology and Biochemistry*. 2013. V. 67. P. 192–211.
20. Preston-Mafham J., Boddy L., Randerson P.F. Analysis of microbial functional diversity using sole-carbon-source utilization profiles – a critique // *FEMS Microbiology Ecology*. 2002. V. 42. P. 1–14.
21. Kruglov Yu.V. Microbial community of soil: physiological diversity patterns and research methods // *Selskohozyaystvennaya biologiya*. 2016. V. 51. No. 1. P. 46–59 (in Russian).
22. Smolla K., Wachtendorf U., Heuer H., Li W.T., Forney L. Analysis of BIOLOG GN substrate utilization patterns by microbial communities // *Applied and Environmental Microbiology*. 1998. V. 64. P. 1220–1225.
23. Horobin R.W. Selection of optimum tetrazolium salts for use in histochemistry: the value of structure-staining correlations // *The Histochemical Journal*. 1982. V. 14. No. 2. P. 301–310.
24. Rodriguez G.G. Use of a fluorescent redox probe for direct visualization of actively respiring bacteria // *Applied Environmental Microbiology*. 1992. V. 58. No. 6. P. 1801–1808.
25. Seidler E. The tetrazolium-formazan system: design and histochemistry. New York: G. Fischer. Stuttgart. 1991. 79 p.
26. Radostin S.Yu., Kalinina A.A., Makedoshin A.S., Sokolova T.N., Kuzina O.V., Kartashov V.R. Reduction of iodinitrotetrazolium by bacterial cells as a method for evaluating their corrosive activity // *Korroziya: materialy, zashhita*. 2015. No. 11. P. 45–48 (in Russian).
27. Modern microbiology: Prokaryotes / Eds. J. Lengeler, G. Drevs, U. Shlegel. Moskva: Mir, 2005. 654 p., 496 p. (in Russian).
28. Smith J.J., McFeters G.A. Mechanisms of INT (2-(4-iodophenyl)-3-(4-nitrophenyl)-5-phenyl tetrazolium chloride), and CTC (5-cyano-2,3-ditolyl tetrazolium chloride) reduction in *Escherichia coli* K-12 // *Journal of Microbiological Methods*. 1997. V. 29. No. 3. P. 161–175.

Статистические характеристики взаимосвязи мутности и расходов воды в реке, вызванных попусками водохранилища

© 2017. А. В. Ялалетдинова¹, аспирант, Л. В. Еникеева¹, ассистент, М. Ю. Воздаева^{1,2}, д. х. н., профессор, Е. А. Кантор¹, д. х. н., профессор,
¹Уфимский государственный нефтяной технический университет, 450062, Россия, Республика Башкортостан, г. Уфа, ул. Космонавтов, 1,
²Муниципальное унитарное предприятие «Уфаводоканал», 450098, Россия, Республика Башкортостан, г. Уфа, ул. Российская, 157/2,
 e-mail: hawk22.89@mail.ru

Проведён анализ временной изменчивости расхода и мутности воды в реке Уфа. Найдены статистические характеристики, описывающие особенности поведения указанных величин в неблагоприятные периоды (паводки): плотности распределения исследуемых параметров, вероятности появления неблагоприятных событий, связанных с ухудшением качества воды. Установлено, что для распределений вероятностей расходов воды и мутности характерны смещённые в сторону больших значений параметров, хвостовые части. Обнаружено, что неустойчивому состоянию реки Уфа, соответствуют расходы воды со значениями большими 450 м³/с. Плотность распределения расходов воды описывается степенной зависимостью $\rho_1(Q) = 98048Q^{-2.72}$, при уровне достоверности $R^2 = 0,84$. Неустойчивому состоянию реки соответствует мутность, значения которой превышают 10 мг/дм³. Степенная аппроксимация плотности распределения мутности $\rho_2(M) = 43,3M^{-2.22}$ имеет уровень достоверности $R^2 = 0,93$. Установлено, что вероятность появления неблагоприятных событий с повышенными значениями расходов воды составляет 80–93%, а для мутности – 75–88%. Определено, что в периоды паводка, с увеличением расхода воды наблюдается увеличение мутности, тогда как в области малых расходов воды (< 450 м³/с) мутность не зависит от расхода. Для оценки зависимости между мутностью и расходом воды сформировано уравнение, позволяющее рассчитать значения мутности в период паводка при значениях расхода воды, превышающих 450 м³/с.

Ключевые слова: водохранилище, расход воды, мутность, плотность распределения, вероятность распределения, квантили распределения.

Statistical characteristics of relationships between turbidity and water flow rate caused by releases of the water reservoir

A. V. Yalaletdinova¹, L. V. Enikeeva¹, M. Yu. Vozhdayeva^{1,2}, E. A. Kantor¹,
¹Ufa State Petroleum Technological University,
 1 Kosmonavtov St, Ufa, Republic of Bashkortostan, Russia, 450062,
²Municipal Unitary Enterprise “Ufavodokanal”,
 157/2 Rossiyskaya St., Ufa, Republic of Bashkortostan, Russia, 450098,
 e-mail: hawk22.89@mail.ru

The temporal variability of water flow rate and turbidity in the Ufa River was estimated. To describe the changes in turbidity and water flow in adverse periods (like floods), such statistic characteristics as distribution density of water flow rate and turbidity and probability of occurrence of adverse events related to deterioration of water quality were found. It is determined that the tail portions of the distributions of the probabilities of water flow rate and turbidity are shifted toward larger values of the investigated parameters. It is detected that when the water flow rate exceeds 450 m³/s, it contributes to an unstable state in the Ufa River. The distribution density of water flow is well described by a power-law dependence $\rho_1(Q) = 98048Q^{-2.72}$ at a 84% coefficient of determination. Turbidity values exceeding 10 mg/dm³ conform to the unstable state of the river. Power-law approximation of the turbidity's density of distribution $\rho_2(M) = 43.3M^{-2.22}$ has a 93% coefficient of determination. It was established that the occurrence probability of adverse events with high water flow rate values is 80–93%. The occurrence probability of adverse events when turbidity has high values is 75–88%. It is determined that the increase in water flow rate during flood periods leads to an increase in turbidity. However, turbidity does not depend on water flow rate if its value is less than 450 m³/s. Assessment of the relationship between the turbidity and the water flow rate in the Ufa River gave possibility to derive an equation which allows calculating the turbidity values in the flood period when flow rates exceed 450 m³/s.

Keywords: water reservoir, water flow rate, turbidity, density of distribution, probability of distribution, quantiles of distribution.

Водоохранилища создаются, как правило, для энергоснабжения городских агломераций, характеризующихся высокой концентрацией промышленных объектов и зонами компактного проживания населения [1, 2]. Они играют существенную роль не только в экономике, но и в экологической обстановке региона. Так, водоохранилища формируют водный режим реки, аккумулируют до 95% твёрдого стока и загрязняющих веществ [3]. Эксплуатация водоохранилищ определяет значительные изменения в окружающей среде (заболачивание и подтопление земель, повышение уровня грунтовых вод, размыв русла рек, развитие процессов эвтрофикации водоёмов и др.), которые приводят к качественным изменениям воды в реках, зарегулированных водоохранилищами, изменяя их химический состав [4–10].

В регионах с высоким уровнем промышленности происходит постоянный рост населения, что, в свою очередь, приводит к увеличению потребления качественной питьевой воды. Водозаборы инфильтрационного типа не справляются с увеличивающейся нагрузкой, а это влечёт необходимость создания поверхностных водозаборов, являющихся наиболее производительными. Однако такие водозаборы более уязвимы, по сравнению с инфильтрационными. На поверхностные водозаборы оказывают влияние сезонные колебания характеристик речного стока, техногенные аварийные выбросы и др. Работа очистных сооружений, которые должны обеспечивать непрерывное снабжение населения водой надлежащего качества, значительно усложняется в периоды паводка. Так, с ростом расхода воды, в реке происходит ухудшение её качества по многим показателям [2, 11–15]. Одним из основных технологических параметров, используемых для анализа работы очистных сооружений водоподготовки, является мутность. Увеличение поверхностного стока с водосборной территории и размыв донных наносов приводят к увеличению взвеси с большим количеством загрязняющих веществ и микроорганизмов, в том числе и патогенных [16, 17]. Кроме того, повышение мутности приводит к ухудшению качества воды по таким показателям, как цветность, окисляемость, запах и др. [18–20]. Таким образом, расход воды, вызванный попусками водоохранилища, и мутность являются важными характеристиками речного стока. На основе прогноза мутности, полученного по величине интенсивности расхода, представляется возможным влиять на качество воды, в результате регулирования процесса

водоочистки, например, за счёт изменения доз коагулянта и флокулянта, времени отстаивания и так далее. Несмотря на то, что расход и мутность связаны между собой, количественные соотношения между этими параметрами в каждом конкретном случае, как правило, не известны.

Сезонное регулирование стока р. Уфа осуществляется Павловским водоохранилищем, а гидродинамический режим реки зависит от режима работы Павловской гидроэлектростанции (ПГЭС) [3]. Поверхностный водозабор (ПВ) расположен на р. Уфа ниже по течению от Павловского гидроузла. Режим работы гидроэлектростанции, во многом определяемый объёмами потребления городской агломерацией электроэнергии, воздействует на водопоток, что приводит к его существенным изменениям, по сравнению с естественными условиями. Это, в свою очередь, оказывает влияние на экологическую обстановку в регионе.

Целью работы было изучение изменений мутности в створе поверхностного водозабора, расположенного на р. Уфа, и поиск связи этих изменений с расходом воды в реке.

Объекты и методы исследований

Объектами исследования послужили данные ежедневных наблюдений за качеством воды по мутности в створе поверхностного водозабора (ПВ) за 1997–2014 гг. и данные по ежедневному количеству сбрасываемой Павловской ГЭС в реку Уфа воды за 2011–2016 гг.

Статистическая обработка включает определение плотности распределения изучаемых величин (расхода воды в реке и показателей качества воды), вычисление вероятности появления неблагоприятных событий, связанных с ухудшением качества воды по исследуемому параметру и поиск зависимостей между мутностью воды и попусками водоохранилища [11, 12].

Определение плотности распределения анализируемых параметров за исследуемый период наблюдений произведено следующим образом:

- построение временных рядов величин расхода и мутности;
- разбиение на интервалы («карманы») определённой длины осей значений расходов (ΔQ) и мутности (ΔM);
- определение частоты попадания точек в i -й «карман» (N_i) для расходов и мутности;
- вычисление относительных частот в результате нормирования полученных в п. 3

значений, путём деления на общее число точек ($f_i = N_i/N$, $N = \sum N_i$);

– нахождение плотности распределения расходов $\rho_1(Q) = f_i/\Delta Q$ и мутности $\rho_2(M) = f_i/\Delta M$.

Вероятности появления неблагоприятных событий, связанных с ухудшением качества воды по исследуемым параметрам, оцениваются по значениям медленно спадающего хвоста плотностей распределений. Для этого производят обработку, описанную выше, а полученные в результате плотности распределения хвоста описывают степенной зависимостью:

$$\rho_1(Q) = AQ^{-1-\alpha} \quad (1)$$

$$\rho_2(M) = BM^{-1-\beta}, \quad (2)$$

где параметры α , β , A и B зависят от особенностей водоисточника [11, 12].

Прогнозирование возможных значений расходов и мутности осуществляют путём нахождения квантилей распределения (Q_p , M_p). Для этого вероятности распределения расходов воды в реке представляют как $F(Q)$, а мутности – как $F(M)$. В области хвоста распределения эта величина принимает вид $\bar{F}(Q) = 1 - F(Q)$ для расходов и $\bar{F}(M) = 1 - F(M)$ – для мутности. Таким образом, распределение параметров будет представлено уравнениями:

$$\bar{F}(Q) = A\alpha^{-1}Q^{-\alpha} \quad (3)$$

$$\bar{F}(M) = B\beta^{-1}M^{-\beta} \quad (4)$$

Величины Q_p и M_p определяются из соотношения $F(Q_p) = p$, $\bar{F}(Q_p) = 1 - p$, $F(M_p) = p$, $\bar{F}(M_p) = 1 - p$, где p – уровень обеспеченности ($0 < p < 1$), при условии, что вероятность $\bar{F}(Q_p)$ – это доля пребывания реки с расходом $Q > Q_p$, а вероятность $\bar{F}(M_p)$ – это доля пребывания реки с мутностью $M > M_p$:

$$Q_p = \left(\frac{A}{\alpha(1-p)} \right)^{\frac{1}{\alpha}} \quad (5)$$

$$M_p = \left(\frac{B}{\beta(1-p)} \right)^{\frac{1}{\beta}} \quad (6)$$

Определение зависимости мутности воды в реке от расходов, вызванных попусками водохранилища, производится из условия, что расход воды и мутность – случайные величины с плотностями распределения $\rho_1(Q)$ и $\rho_2(M)$. Зависимость между величинами представляется в виде $M = f(Q)$, где $f(Q)$ – дифференцируемая и монотонно возрастающая на всём интервале изменения аргумента функция.

Согласно теореме о распределении значений функции случайной величины [12] выводится соотношение $\rho_2(M) = \rho_2(f(Q))$; $\rho_2(f(Q)) f'(Q) = \rho_1(Q)$, которое рассматривается как дифференциальное уравнение относительно неизвестной функции f : $Vf^{1-\beta}f' = AQ^{-1-\alpha}$, $f = \left(C + \frac{\beta A}{\alpha B} Q^{-\alpha} \right)^{-\frac{1}{\beta}}$, где C – постоянная интегрирования.

Мутность и расход, таким образом, связываются соотношением:

$$M = \left(C + \frac{\beta A}{\alpha B} Q^{-\alpha} \right)^{-\frac{1}{\beta}}, \quad (7)$$

где параметр C определяет уровень плато, на которое выходит мутность с увеличением расхода, и вычисляется при $Q \rightarrow \infty$, $M \rightarrow C^{-\frac{1}{\beta}}$:

$$M_{max} = C^{-\frac{1}{\beta}} \quad (8)$$

Результаты и их обсуждение

Расход воды. Ледостав на реке Уфа начинается в конце октября – начале декабря, вскрытие – в апреле – начале мая. Преимущественное питание реки снеговое, поэтому основная доля стока приходится на весеннее половодье по сравнению с более слабыми дождевыми паводками осенью и сравнительно устойчивой зимней меженью.

За исследуемый шестилетний период пики половодья различной интенсивности наблюдаются в апреле– мае (рис. 1).

Максимальный годовой расход, равный 2898 м³/с, отмечен в апреле 2016 г. В 2011 г. годовой максимум попусков водохранилища пришёлся на май и составил 875 м³/с. В 2012 и 2013 гг. максимумы зафиксированы в апреле и равны 1156 и 1551 м³/с соответственно. Для 2014 и 2015 гг. максимальные расходы зарегистрированы в мае и составляют 2673 м³/с и 1956 м³/с.

Так, например, вскрытие реки Уфа в 2015 г. происходило в условиях затяжной весны, характеризующейся неустойчивым характером погоды с резкими колебаниями температуры воздуха. Из-за пассивного поступления талой воды в речную сеть разрушение ледяного покрова проходило постепенно в период с 2–16 апреля (на 2–6 дней раньше нормы). В результате дефицита осадков, сухой и солнечной погоды, установившейся в марте, происходило вымерзание влаги из снежного покрова, что привело к потере стока. Значительное влияние на формирование весеннего половодья реки Уфы оказали осадки в виде дождя. Макси-

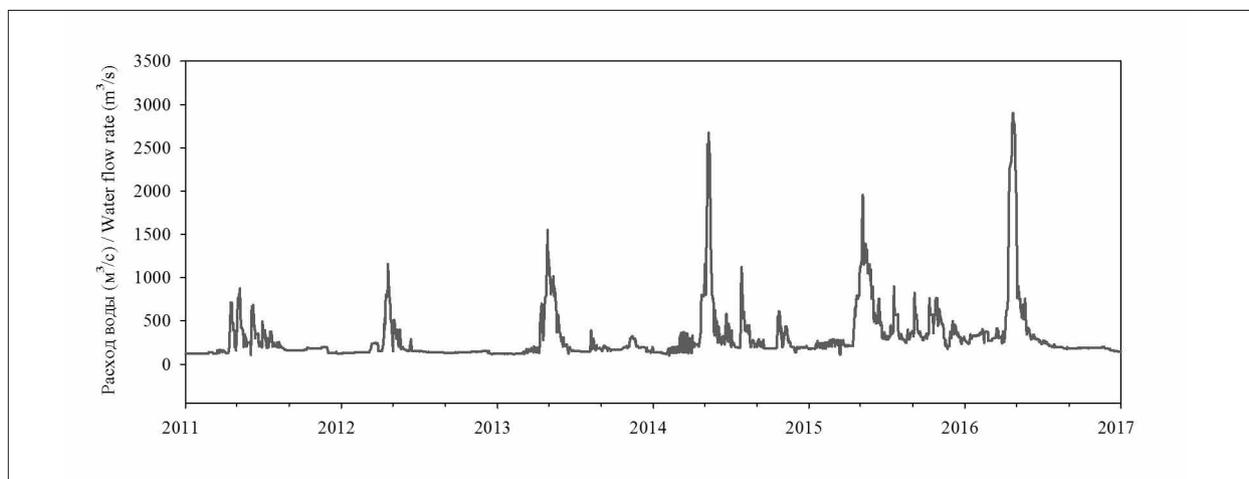


Рис. 1. Гидрограф расходов воды, проходящих через плотину Павловского водохранилища с 2011 по 2016 гг.
Fig. 1. Hydrograph of water flow rate through the dam of the Pavlovskoe reservoir from 2011 to 2016

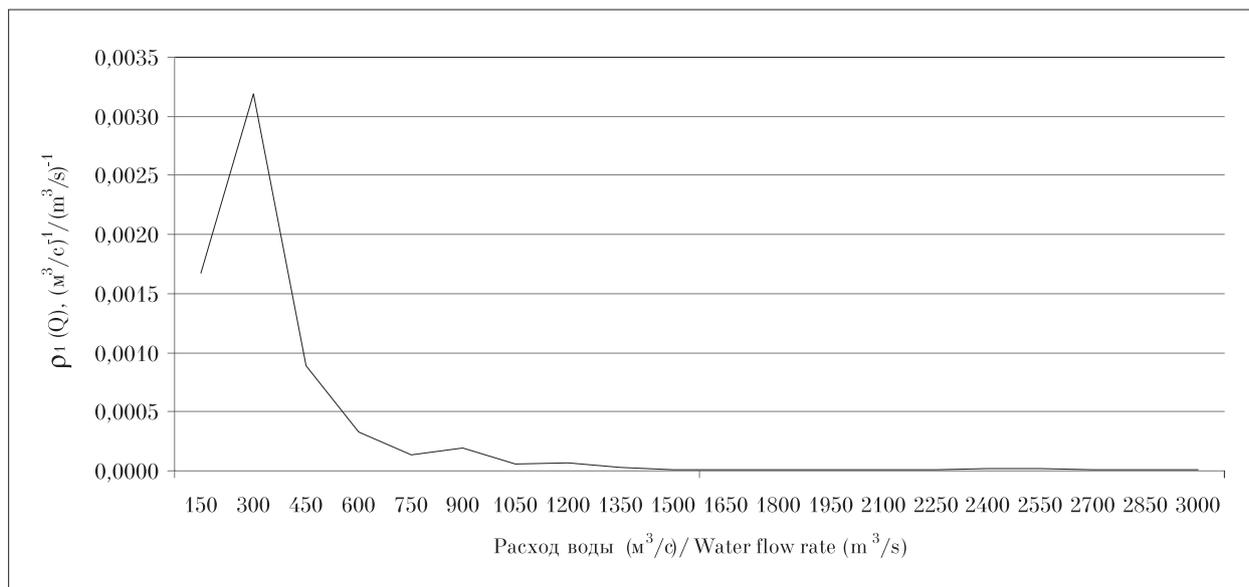


Рис. 2. Плотность распределения расходов воды в реке $\rho_1(Q)$, $(\text{m}^3/\text{c})^{-1}$
Fig. 2. The density of distribution of water flow rate in the river $\rho_1(Q)$, $(\text{m}^3/\text{s})^{-1}$

мальные уровни прошли с 27 апреля по 8 мая (отклонение от нормы составило от -4 до +10 дней) [21]. В то же время осенне-зимний период 2015–2016 гг. отмечался крайне неустойчивым характером погоды и значительными отклонениями паводкообразующих параметров от климатической нормы. По данным снегосъёмки 2016 г., запасы воды в снежном покрове близки к норме, но на 10–20% выше средних многолетних значений на весну. Вскрытие среднего и нижнего течения реки проходило со 2 по 9 апреля [22].

Плотность распределения расходов в реке (рис. 2) определялась из гидрографа, для этого ось расходов разбита на интервалы («карманы») длиной $\Delta Q = 150 \text{ m}^3/\text{c}$.

Максимальная плотность распределения расходов показывает, что наиболее вероятный расход приходится на $300 \text{ m}^3/\text{c}$ (рис. 2), что сравнимо со средним расходом в реке Уфа, равным $304 \text{ m}^3/\text{c}$. Статистические характеристики распределения свидетельствуют об асимметрии распределения, а её величина, равная 3,2, указывает на смещение распределения в сторону больших расходов воды. Положительный эксцесс, равный 10,3, означает, что по сравнению с нормальным распределением, кривая имеет ярко выраженную остроконечность.

Расходы от $100\text{--}450 \text{ m}^3/\text{c}$ отмечаются наиболее часто. Распределение расходов имеет медленно спадающий, тяжёлый хвост при $Q > 450 \text{ m}^3/\text{c}$. Следует отметить, что большие

расходы воды в реке, которые характеризуют её неустойчивое состояние (паводок), попадают в хвост. Так как в интервале расходов от 450 до 2900 м³/с данных недостаточно, то для построения хвоста (рис. 3) взяты более крупные «карманы» $\Delta Q = 300$ м³/с.

Плотность распределения расходов воды при $Q = 450\text{--}2900$ м³/с описывается степенной зависимостью (1) и принимает вид $\rho_1(Q) = 98048Q^{-2.72}$ при уровне достоверности $R^2 = 0,84$. Параметры α и A для реки Уфа составляют 1,72 и 98048 соответственно.

Спрогнозировать возможные расходы в реке позволяют квантили распределения Q_p (5). В результате подстановки значений параметров получены расходы разного уровня обеспеченности: $Q_{0,8} = 1484$, $Q_{0,85} = 1754$, $Q_{0,9} = 2221$, $Q_{0,93} = 2732$ м³/с. Все они попадают в допустимый интервал расходов 450–2900 м³/с, где справедлива аппроксимация $\rho_1(Q) = 98048Q^{-2.72}$.

Мутность воды. Мутность определяется смывом органических и неорганических веществ с поверхности водосбора, а также продуктами эрозии речного русла [23, 24]. Несмотря на то, что в большинстве случаев значительный вклад в мутность вносят взвешенные вещества, смываемые с поверхности водосборного бассейна, с увеличением расхода воды в реке, вызванным попусками ПГЭС, происходит увеличение мутности. Это, очевидно, связано с тем, что находящийся на дне водохранилища ил с увеличением расхода в большей степени увлекается водой [3].

В реке Уфа мутность достигает максимальных значений в период весеннего паводка и достаточно быстро снижается за летние месяцы. Осенью, во время дождей, значения мутности незначительно возрастают, а наименьшие значения показателя отмечаются в зимний период (начиная с ледостава) (рис. 4).

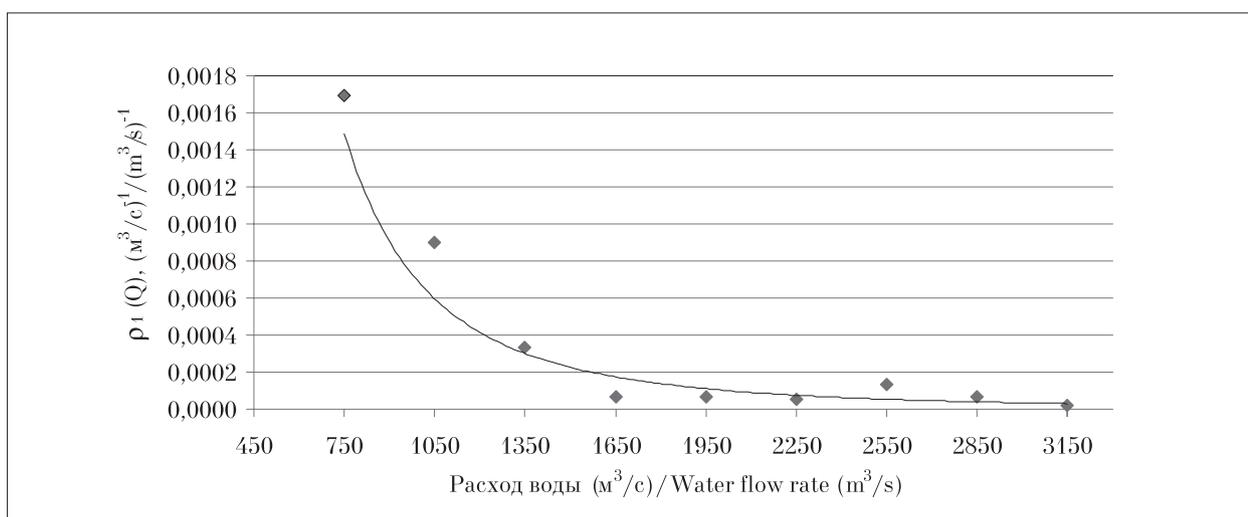


Рис. 3. Плотность распределения больших расходов воды в реке (хвост), $\rho_1(Q)$, (м³/с)⁻¹
Fig. 3. Density of distribution of a large water flow rate in the river (tail), $\rho_1(Q)$, (m³/s)⁻¹

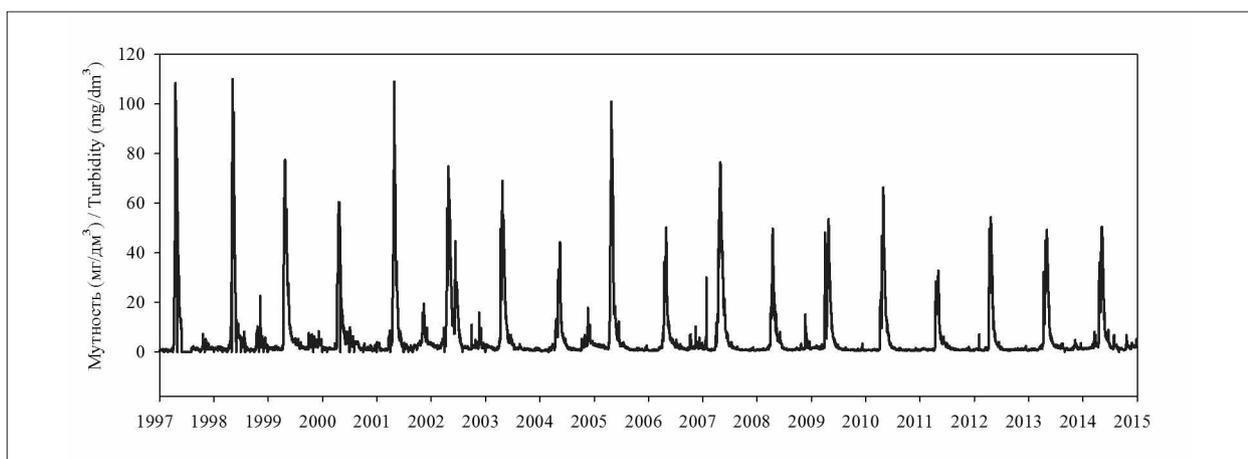


Рис. 4. Временной ряд ежедневных значений мутности воды в реке Уфа с 1997 по 2014 гг.
Fig. 4. Time series of daily values of turbidity in the Ufa river from 1997 to 2014

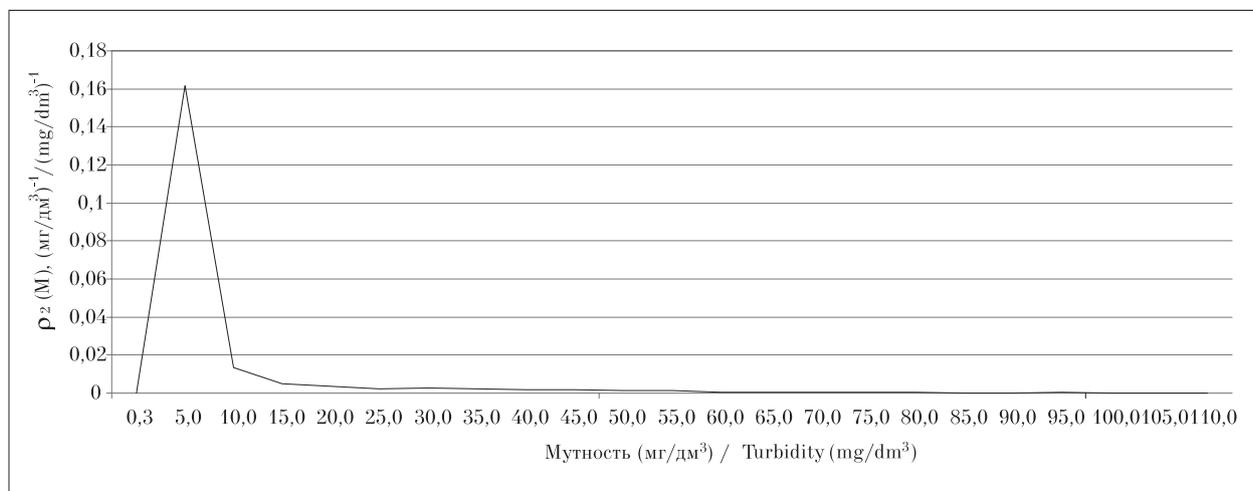


Рис. 5. Плотность распределения мутности воды в реке $\rho_2(M)$, $(\text{мг/дм}^3)^{-1}$
Fig. 5. The density of distribution of water turbidity in the river $\rho_2(M)$, $(\text{mg/dm}^3)^{-1}$

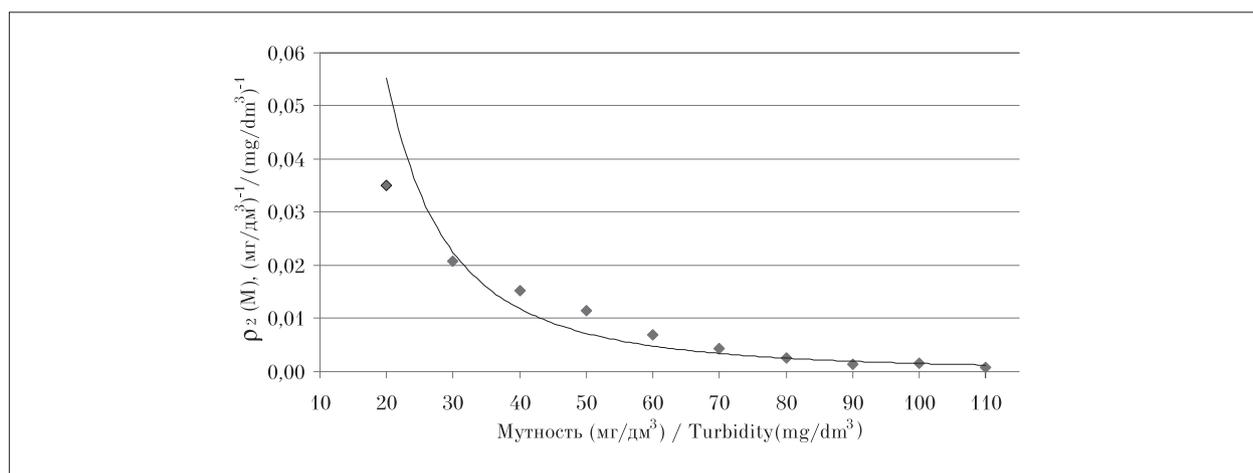


Рис. 6. Плотность распределения больших значений мутности воды в реке (хвост), $\rho_2(M)$, $(\text{мг/дм}^3)^{-1}$
Fig. 6. Density of distribution of large turbidity values in the river (tail), $\rho_2(M)$, $(\text{mg/dm}^3)^{-1}$

Плотность распределения мутности (рис. 5) найдена путём нормирования частоты попадания значений показателя в карманы длиной $\Delta M = 5 \text{ мг/дм}^3$ каждый.

Максимум кривой плотности распределения достигается при мутности равной 5 (рис. 5), среднее значение мутности в реке составляет $5,8 \text{ мг/дм}^3$. Статистические характеристики распределения, асимметрия (4,7) и эксцесс (22,6), свидетельствуют о сильной асимметрии распределения по сравнению с нормальным.

Хвост начинается с 10 мг/дм^3 (рис. 5). Большие значения мутности воды в реке отмечаются весной, в период паводка. Вероятности больших значений мутности оценены по хвосту, для его построения использованы «карманы» $\Delta M = 10 \text{ мг/дм}^3$ (рис. 6).

Плотность распределения мутности при её значениях от 10 до 110 мг/дм^3 описывается

степенной зависимостью (2) и принимает вид $\rho_2(M) = 43,3M^{-2,22}$, при уровне достоверности $R^2 = 0,93$. Параметры β и B для реки Уфа составляют 1,22 и 43,3 соответственно.

Квантили распределения (6) позволили получить значения мутности разного уровня обеспеченности: $M_{0,75} = 58$, $M_{0,8} = 70$, $M_{0,85} = 88$, $M_{0,88} = 106 \text{ мг/дм}^3$. Все они попадают в допустимый интервал от 10 до 110 мг/дм^3 , где справедлива аппроксимация $\rho_2(M) = 43,3M^{-2,22}$.

Взаимосвязь мутности и расхода воды. Для определения зависимости мутности воды в реке от расходов, вызванных попусками ПГЭС, будем исходить из условия, что расход воды и мутность – случайные величины с плотностями распределения $\rho_1(Q)$ и $\rho_2(M)$.

Согласно (7) и (8):

$$M = \left(C + \frac{1,22 \cdot 98048}{1,72 \cdot 43,3} Q^{-1,72} \right)^{\frac{1}{1,22}},$$

где C – постоянная интегрирования.

$$M_{\max} = C^{-\frac{1}{1,22}},$$

при $M_{\max} = 110 \text{ мг/дм}^3$, $C = 0,003$.

Таким образом, мутность и расход в реке Уфа связаны соотношением:

$$M = (0,003 + \frac{1,22 \cdot 98048}{1,72 \cdot 43,3} Q^{-1,72})^{-\frac{1}{1,22}} \quad (9)$$

Из истинных значений мутности выбрана исходная мутность ($M_{\text{ист.}}$), устанавливаемая в

реке в паводковый период 2011–2014 гг. при $Q > 450 \text{ м}^3/\text{с}$ ($M_{\text{ист.}} > 10 \text{ мг/дм}^3$), расчётные значения мутности ($M_{\text{расч.}}$) получены из соотношения (9) при условии, что $Q > 450 \text{ м}^3/\text{с}$ (рис. 7).

Сравнение расчётных значений мутности с истинными значениями (рис. 7) показывает, что средняя погрешность прогноза составила 32%.

Паводок, относящийся к сезонным факторам, влияющим на изменение мутности воды в реке Уфа, сопровождается повышенными

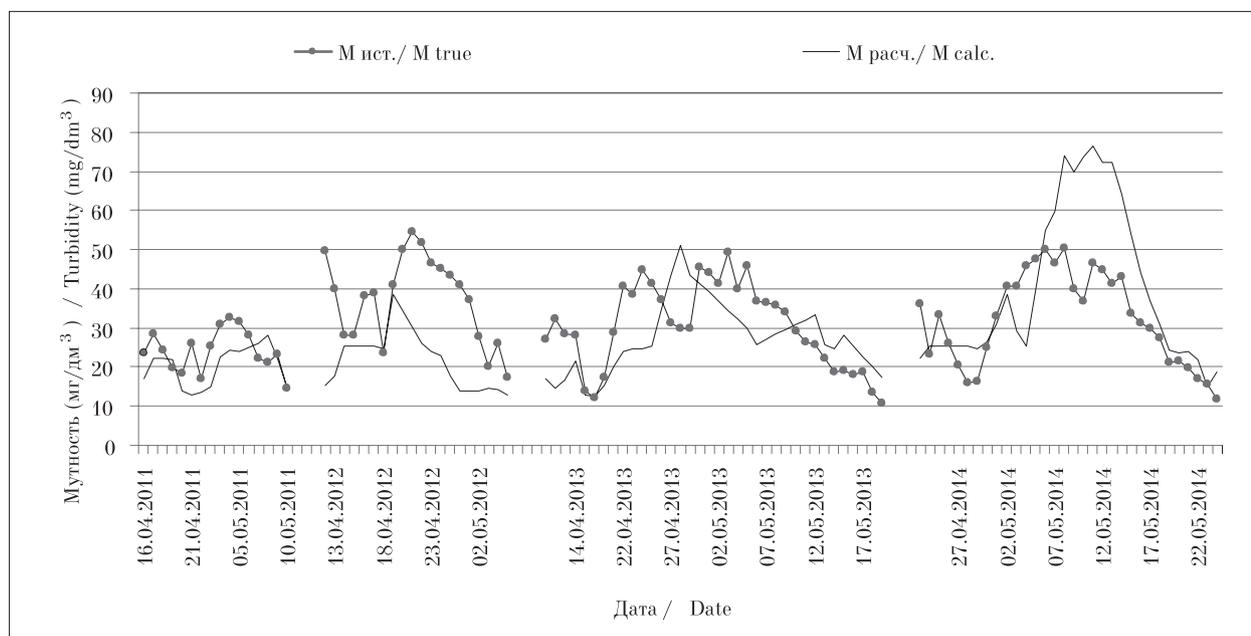


Рис. 7. Истинные ($M_{\text{ист.}}$) и расчётные ($M_{\text{расч.}}$) значения мутности воды в реке Уфа в паводковый период 2011–2014 гг. / Fig. 7. The true (M_{true}) and calculated ($M_{\text{calc.}}$) values of the turbidity of water in the Ufa River in the 2011–2014 flood period

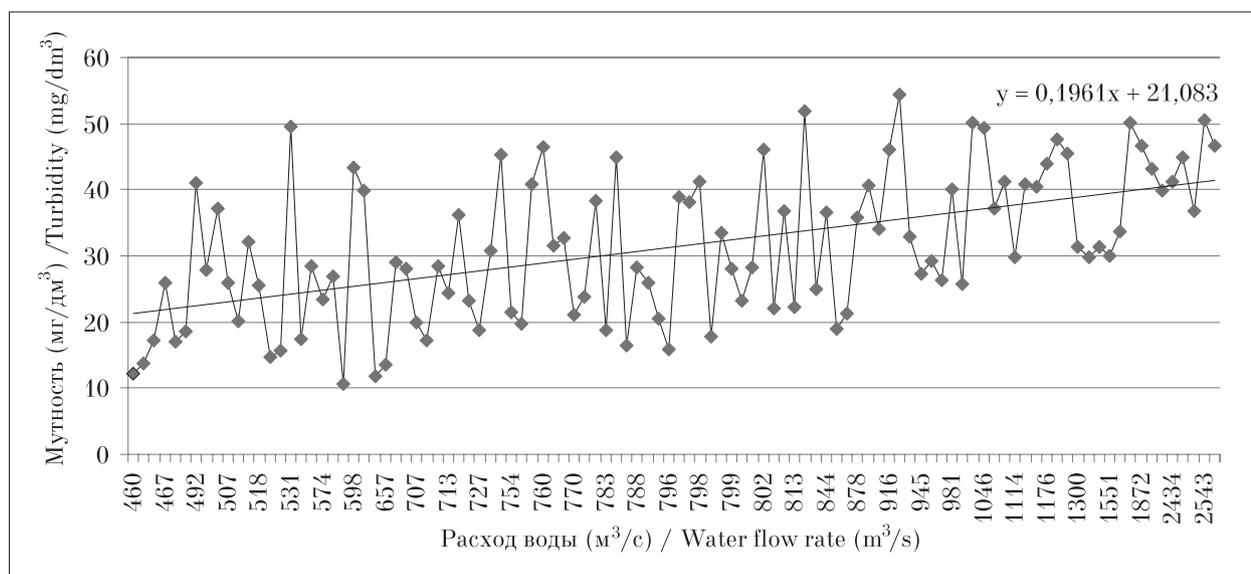


Рис. 8. Истинные значения мутности ($M_{\text{ист.}}$) воды в реке Уфа при $Q > 450 \text{ м}^3/\text{с}$ за 2011–2014 гг. / Fig. 8. The true values of the turbidity (M_{true}) of water in the Ufa River at water flow rate $> 450 \text{ м}^3/\text{с}$ for 2011–2014

значениями расходов воды (больше 450 м³/с) и мутности (больше 10 мг/дм³) (рис. 1, 4).

Коэффициент корреляции, позволяющий установить зависимости между величинами, описывает связь между расходами воды и М_{ист.} как умеренную (по шкале Чеддока 0,3–0,5 [25]), и равен 0,48. Такая корреляция расходов с истинными значениями показателя связана с некоторыми неучтенными факторами, например, временем добегания воды от водохранилища до исследуемого створа, которое спрогнозировать довольно затруднительно, так как при различных значениях расхода, скорость добегания потока меняется. Следует отметить, что наблюдается тенденция увеличения истинной мутности с увеличением расхода воды (рис. 8).

Анализ временных рядов по мутности в створе ПВ показал, что наибольший вклад (от 69 до 74%) вносит сезонная величина, тогда как вклад случайной компоненты не превышает 25%. Для расходов воды значения компонент практически равны (сезонная от 47 до 48%, случайная от 41 до 43%).

Заключение

Хвостовые части распределений вероятностей (хвосты) расходов воды и мутности, образованные из-за смещения распределений от нормального, показывают, что неблагоприятным событиям в реке Уфа соответствуют расходы воды со значением, большим 450 м³/с, и мутность, превышающая 10 мг/дм³.

Хвостовые распределения расходов воды и мутности в реке Уфа описываются степенными зависимостями $\rho_1(Q) = 98048Q^{-2,72}$ и $\rho_2(M) = 43,3M^{-2,22}$ при больших уровнях достоверности (0,84 и 0,93 соответственно).

Квантили распределения, позволившие рассчитать значения расхода и мутности разной обеспеченности, показали, что вероятность неблагоприятных ситуаций, при которых параметры имеют повышенные значения, для расходов воды составляет 80–93%, а для мутности – 75–88%.

Показано, что мутность не зависит от расходов воды, когда их значения меньше 450 м³/с. В паводок, когда расходы воды достигают 450 м³/с, дальнейший рост их значений приводит к увеличению мутности в реке.

Получено уравнение:

$$M = (0,003 + \frac{1,22 \cdot 98048}{1,72 \cdot 43,3} Q^{-1,72})^{\frac{1}{1,22}}$$
, позволяющее спрогнозировать значения мутности в период паводка, с погрешностью прогноза, равной 32%.

Работа выполнена при поддержке гранта Республики Башкортостан молодым учёным и молодёжным научным коллективам в 2017 году № 5 (ГАН-02-17) «Роль Павловского водохранилища в формировании химического состава воды реки Уфа по некоторым показателям качества воды».

Литература

1. Branche E. The multipurpose water uses of hydro-power reservoir: The SHARE concept // Comptes Rendus Physique. 2017. V. 18. No. 7–8. P. 469–478.
2. Schletterer M., Hofer B., Obendorfer R., Hammer A., Hubmann M., Schwarzenberger R., Boschi M., Haun S., Haimann M., Holzapfel P., Habersack H., Brock B., Schmalzer B., Hauer C. Integrative monitoring approaches for the sediment management in alpine reservoirs: Case study Gepatsch (HPP Kaunertal, Tyrol) // River Sedimentation – Proceedings of the 13th International Symposium on River Sedimentation. 2016. P. 1161–1169.
3. Жигалова А.В. Системы «водохранилище – река» и роль Павловского водохранилища в формировании химического состава воды реки // Вестник молодого учёного УГНТУ. 2017. № 1(09). С. 30–35.
4. Веницианов Е.В. Проблемы управления и регулирования качества вод водных объектов России // Управление развитием крупномасштабных систем: Материалы Восьмой международной конференции. М., 2015. Т. II. С. 65–70.
5. Jeznach L.C., Hagemann M., Park Mi-Hyun, Tobiasson J.E. Proactive modeling of water quality impacts of extreme precipitation events in a drinking water reservoir // Journal of Environmental Management. 2017. V. 201. No. 10. P. 241–251.
6. Al-Nasrawia Ali K.M., Jonesa B.G., Alyazichia Y.M., Hamyltona S.M., Jameelb M.T., Hammadic A.F. Civil-GIS incorporated approach for water resource management in a developed catchment for urban-geomorphic sustainability: Tallowa Dam, southeastern Australia // International Soil and Water Conservation Research. 2016. V. 4. No. 4. P. 304–313.
7. Nilsson C., Reidy C. A., Dynesius M., Revenga C. Fragmentation and flow regulation of the world's large river systems // Science. 2005. V. 308. P. 405–408.
8. Humborg C., Ittekkot V., Cociasu A., Von Bodungen B. Effect of Danube River dam on Black Sea biogeochemistry and ecosystem structure // Nature. 1997. V. 386. No. 6623. P. 385–388.
9. Nilsson C., Berggren K. Alterations of riparian ecosystems caused by river regulation // BioScience. 2000. V. 50. No. 9. P. 783–792.
10. Jansson R., Nilsson C., Renofalt B. Fragmentation of riparian floras in rivers with multiple dams // Ecology. 2000. V. 81. No. 4. P. 899–903.
11. Долгоносов Б.М., Власов Д.Ю., Дятлов Д.В., Сурачева Н.О., Григорьева С.В., Корчагин К.А. Стати-

стические характеристики изменчивости качества воды, поступающей на водопроводную станцию // Инженерная экология. 2004. № 3. С. 2–20.

12. Dolgonosov B.M., Korchagin K.A. Statistical assessment of relationships between water flow in a river and water turbidity in water intakes // Water Resources. 2005. V. 32. No. 2. P. 175–182.

13. Jianguo C., Wenhao Z., Shanshan H., Gao Hu S. Influences of retrogressive erosion of reservoir on sedimentation of its downstream river channel – A case study on Sanmenxia Reservoir and the Lower Yellow River // International Journal of Sediment Research. 2017. V. 32. No. 3. P. 373–383.

14. Weber M., Rinke K., Hipsey M.R., Boehrer B. Optimizing withdrawal from drinking water reservoirs to reduce downstream temperature pollution and reservoir hypoxia // Journal of Environmental Management. 2017. V. 197. P. 96–105.

15. Wang Z., Xia J., Lib T., Denga S., Zhang J. An integrated model coupling open-channel flow, turbidity current and flow exchanges between main river and tributaries in Xiaolangdi Reservoir, China // Journal of Hydrology. 2016. V. 543. Part B. P. 548–561.

16. Zhang X. Water quality turbidity detection based on image recognition system design and implementation // Advances in Intelligent Systems and Computing. 2016. V. 613. P. 63–70.

17. Dynesius M., Nilsson C. Fragmentation and flow regulation of river systems in the northern third of the world // Science. 1994. V. 266. No. 5186. P. 753–762.

18. Gippel C.J. Potential of turbidity monitoring for measuring the transport of suspended solids in streams // Hydrological Processes. 1995. V. 9. No. 1. P. 83–97.

19. Lewis J. Turbidity-controlled suspended sediment sampling for runoff-event load estimation // Water Resources Research. 1996. V. 32. No. 7. P. 2299–2310.

20. Zhang J., Wei Z., Jia H., Huang X. Factors influencing water quality indices in a typical urban river originated with reclaimed water // Frontiers of Environmental Science and Engineering. 2017. V. 11. No. 4. P. 8.

21. Уровни рек. Обзор прохождения весеннего половодья 2015 г [Электронный ресурс] <http://www.meteorb.ru/ravodok> (Дата обращения: 16.09.2017).

22. Прогноз циклических чрезвычайных ситуаций, обусловленных весенним снеготаянием, на территории Республики Башкортостан на 2016 год [Электронный ресурс] <http://ugzneft.ru> (Дата обращения: 16.09.2017).

23. Stenberg L., Tuukkanen T., Finer L., Marttila H., Piirainen S., Kløve B., Koivusalo H. Ditch erosion processes and sediment transport in a drained peatland forest // Ecological Engineering. 2015. V. 75. P. 421–433.

24. Gao P., Pasternack G.B., Bali K.M., Wallender W.W. Estimating suspended sediment concentration using turbidity in an irrigation-dominated Southeastern California watershed // Journal of Irrigation and Drainage Engineering. 2008. V. 134. No. 2. P. 250–259.

25. Якушев А.А., Горбатков С.А., Габдрахманова Н.Т. Многомерные статистические методы и нейросетевые модели в экономическом анализе. Уфа: Издательский центр «Башкирский территориальный институт профессиональных бухгалтеров», 2001. 266 с.

References

1. Branche E. The multipurpose water uses of hydro-power reservoir: The SHARE concept // Comptes Rendus Physique. 2017. V. 18. No. 7–8. P. 469–478.

2. Schletterer M., Hofer B., Obendorfer R., Hammer A., Hubmann M., Schwarzenberger R., Boschi M., Haun S., Haimann M., Holzapfel P., Habersack H., Brock B., Schmalzer B., Hauer C. Integrative monitoring approaches for the sediment management in alpine reservoirs: Case study Gepatsch (HPP Kaunertal, Tyrol) // River Sedimentation – Proceedings of the 13th International Symposium on River Sedimentation. 2016. P. 1161–1169.

3. Zhigalova A.V. “Storage reservoir – river” systems and the role of Pavlovskoye storage reservoir in the formation chemical composition of the river water // Vestnik molodogo uchenogo UGNTU. 2017. No. 1 (09). P. 30–35 (in Russian).

4. Venitsianov E.V. Problems of water quality management and quality control in Russia // Management of the development of large-scale systems: Materialy Vosmoy mezhdunarodnoy konferentsii. Moskva, 2015. V. II. P. 65–70 (in Russian).

5. Jeznach L.C., Hagemann M., Park Mi-Hyun, Tobiasson J.E. Proactive modeling of water quality impacts of extreme precipitation events in a drinking water reservoir // Journal of Environmental Management. 2017. V. 201. No. 10. P. 244–251.

6. Al-Nasrawia Ali K.M., Jonesa B.G., Alyazichia Y.M., Hamyltona S.M., Jameelb M.T., Hammadic A.F. Civil-GIS incorporated approach for water resource management in a developed catchment for urban-geomorphic sustainability: Tallowa Dam, southeastern Australia // International Soil and Water Conservation Research. 2016. V. 4. No. 4. P. 304–313.

7. Nilsson C., Reidy C. A., Dynesius M., Revenga C. Fragmentation and flow regulation of the world’s large river systems // Science. 2005. V. 308. P. 405–408.

8. Humborg C., Ittekkot V., Cociasu A., Von Bodungen B. Effect of Danube River dam on Black Sea biogeochemistry and ecosystem structure // Nature. 1997. V. 386. No. 6623. P. 385–388.

9. Nilsson C., Berggren K. Alterations of riparian ecosystems caused by river regulation // BioScience. 2000. V. 50. No. 9. P. 783–792.

10. Jansson R., Nilsson C., Renofalt B. Fragmentation of riparian floras in rivers with multiple dams // Ecology. 2000. V. 81. No. 4. P. 899–903.

11. Dolgonosov B.M., Vlasov D.Yu., Dyatlov D.V., Suracheva N.O., Grigoryeva S.V., Korchagin K.A. Statisti-

cal characteristics of the variability of water quality entering the waterworks // *Inzhenernaya ekologiya*. 2004. No. 3. P. 220 (in Russian).

12. Dolgonosov B.M., Korchagin K.A. Statistical assessment of relationships between water flow in a river and water turbidity in water intakes // *Water Resources*. 2005. V. 32. No. 2. P. 175–182.

13. Jianguo C., Wenhao Z., Shanshan H., Gaohu S. Influences of retrogressive erosion of reservoir on sedimentation of its downstream river channel – A case study on Sanmenxia Reservoir and the Lower Yellow River // *International Journal of Sediment Research*. 2017. V. 32. No. 3. P. 373–383.

14. Weber M., Rinke K., Hipsey M.R., Boehrer B. Optimizing withdrawal from drinking water reservoirs to reduce downstream temperature pollution and reservoir hypoxia // *Journal of Environmental Management*. 2017. V. 197. P. 96–105.

15. Wang Z., Xia J., Lib T., Denga S., Zhang J. An integrated model coupling open-channel flow, turbidity current and flow exchanges between main river and tributaries in Xiaolangdi Reservoir, China // *Journal of Hydrology*. 2016. V. 543. Part B. P. 548–561.

16. Zhang X. Water quality turbidity detection based on image recognition system design and implementation // *Advances in Intelligent Systems and Computing*. 2016. V. 613. P. 63–70.

17. Dynesius M., Nilsson C. Fragmentation and flow regulation of river systems in the northern third of the world // *Science*. 1994. V. 266. No. 5186. P. 753–762.

18. Gippel C.J. Potential of turbidity monitoring for measuring the transport of suspended solids in streams // *Hydrological Processes*. 1995. V. 9. No. 1. P. 83–97.

19. Lewis J. Turbidity-controlled suspended sediment sampling for runoff-event load estimation // *Water Resources Research*. 1996. V. 32. No. 7. P. 2299–2310.

20. Zhang J., Wei Z., Jia H., Huang X. Factors influencing water quality indices in a typical urban river originated with reclaimed water // *Frontiers of Environmental Science and Engineering*. 2017. V. 11. No. 4. P. 8.

21. Levels of rivers. Review of the passage of the spring high water 2015 [Internet resource] <http://www.meteorb.ru/pavodok> (Accessed: 16.09.2017) (in Russian).

22. The forecast of cyclical emergency situations caused by spring snowmelt in the territory of the Republic of Bashkortostan for 2016 [Internet resource] <http://ugzneft.ru> (Accessed: 16.09.2017) (in Russian).

23. Stenberg L., Tuukkanen T., Finer L., Marttila H., Piirainen S., Kløve B., Koivusalo H. Ditch erosion processes and sediment transport in a drained peatland forest // *Ecological Engineering*. 2015. V. 75. P. 421–433.

24. Gao P., Pasternack G.B., Bali K.M., Wallender W.W. Estimating suspended sediment concentration using turbidity in an irrigation-dominated Southeastern California watershed // *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*. 2008. V. 134. No. 2. P. 250–259.

25. Yakushev A.A., Gorbatkov S.A., Gabdrakhmanova N.T. Multivariate statistical methods and neural network models in economic analysis. Ufa: Izdatelskiy tsentr “Bashkirskiy territorialnyy institut professionalnykh bukhgalterov”, 2001. 266 p (in Russian).

Влияние растительного покрова и содержания органического вещества на накопление хлорорганических соединений в почвах

© 2018. Е. А. Мамонтова, к. м. н., с. н. с., Е. Н. Тарасова, к. х. н., с. н. с.,
А. А. Мамонтов, к. б. н., с. н. с., Е. В. Иванов, м. н. с.,
Институт геохимии им. А. П. Виноградова Сибирского отделения РАН,
664033, Россия, Иркутск, ул. Фаворского, 1А,
e-mail: elenam@igc.irk.ru

Исследование стойких органических загрязнителей (СОЗ) в почвах разных типов и в разных фитоценозах, находящихся на небольшой фоновой территории на острове Ольхон, позволило оценить влияние содержания органического вещества и его элементного состава на накопление токсикантов в почвах. Содержание практически всех индивидуальных соединений и их групп достоверно ($p < 0,05$) зависит от уровня $C_{\text{орг}}$, $N_{\text{орг}}$ и $P_{\text{орг}}$ как в почвах открытых пространств, так и в почвах лесных территорий. Показано, что леса служат лучшими адсорбентами СОЗ из атмосферного воздуха по сравнению с растительностью открытых пространств, а лесная почва является лучшим накопителем СОЗ по сравнению с почвами открытых пространств. Наибольшие концентрации найдены в сосновом и лиственничном лесу, наименьшие – в песке дюн Нурганского песчаного массива и почвах степи. Отмечена разница в качественном составе СОЗ в почвах. Содержание СОЗ в почвах открытых пространств (дюн, степей, лугов) обусловлено осаждением поллютантов из атмосферного воздуха (как прямым сухим газообразным или сухим с аэрозольными частицами, так и влажным с дождём или снегом). На лесных территориях накопление СОЗ в большей степени опосредовано влиянием древесной растительности. Различие в накоплении СОЗ в почвах лесных, луговых и степных экосистем оказывает влияние и на уровень риска для здоровья населения.

Ключевые слова: хлорорганические соединения, почва, органическое вещество, растительность.

The influence of vegetation cover and the content of organic matter on the accumulation of organochlorine compounds in soils

Е. А. Mamontova, E. N. Tarasova, A. A. Mamontov, E. V. Ivanov,
A. P. Vinogradov Institute of Geochemistry Siberian Branch of RAS,
1A, Favorskiy St., Irkutsk, Russia, 664033,
e-mail: elenam@igc.irk.ru

The investigation of persistent organic pollutants (POPs) in soil of different types and in different phytocenoses located on small background area on the Island of Olkhon on Lake Baikal allow assessing the influence of soil organic matter content and its elemental composition on the accumulation of toxicants in soil. The content of about all individual polychlorinated biphenyls (PCBs) and organochlorine pesticides (OCPs) and its groups depends on levels of C_{org} , N_{org} and P_{org} in soil of open land and forest land ($p < 0.05$). It is found that forests are better adsorbents of POPs from air in comparison with vegetation of open land. The forest soil is better accumulator of POPs in comparison of open land soil. The highest POPs levels were found in soil of pine forest and larch forest. The lowest POPs levels were found in sand of dunes of Nurganskiy sandy massif and steppe soil. The difference of quality composition of POPs in soil was also found. The ratio of (DDD+DDE)/DDT below 1 was found in forest soils, while the index in steppe and meadow soils is higher than 1, in sand dunes it varied from 0.76 to 2.4. The relative homological pattern of PCBs is also different. The proportion of tetrachlorobiphenyls is higher in sand of dunes, meadow and steppe soils than it in forest soils. The proportion of hexachlorobiphenyls is vice versa higher in forest soil than in soil of open lands. The direct dry gaseous deposition, dry particulate and wet (with rain and snow) deposition of POPs from air influence primary on content of toxicants in soil of open land (dunes, steppe, grassland). The forest vegetation is the primary factor influencing on accumulation of POPs in forest land. The difference in accumulation of POPs in soil of forest and open land make effect on human health risk levels.

Keywords: organochlorine compounds, organic matter, plant canopy.

Стойкие органические загрязнители (СОЗ) – это группа опасных токсичных соединений, проблема загрязнения окружающей среды которыми является одной из основных в настоящее время наряду с проблемами радиоактивного загрязнения, изменения климата и др. В группу СОЗ входят целевые продукты промышленного производства – хлорорганические пестициды (ХОП), в т. ч. дихлордифенилтрихлорэтан (ДДТ) и его метаболиты, гексахлорциклогексан (ГХЦГ), гексахлорбензол (ГХБ), полихлорированные бифенилы (ПХБ) и др., а также побочные продукты промышленного производства – полихлорированные дибензо-пара-диоксины и дибензофураны (ПХДД/Ф). Данные соединения подпадают под действие Стокгольмской, Роттердамской и Базельской конвенций (<http://www.pops.int/>). Они токсичны, способны накапливаться по пищевым цепям и сохраняться в объектах окружающей среды длительное время [1, 2]. СОЗ вызывают отдалённые эффекты, включая онкологические заболевания, нарушения развития, а также эндокринные, репродуктивные, иммунологические расстройства и др. В результате трансграничного атмосферного переноса СОЗ поступают в удалённые от источников районы мира и становятся, таким об-

разом, проблемой как промышленно развитых стран, так и на фоновых территориях [1, 3]. В почвы СОЗ поступают путём сухого и мокрого осаждения, а также с опадом растений [4]. Взаимосвязь распределения СОЗ и органического вещества (ОВ) почв была показана в исследовании фоновых почв в глобальном и региональном масштабах [3, 5]. При этом коэффициент корреляции 0,38–0,42 соответствовал средней силе связи, что связано с влиянием других факторов, таких, как локальные эмиссии, разные скорости процессов распада и накопления СОЗ в почвах, вызванные климатическими и географическими различиями в местах отбора [3].

Цель данного исследования – изучить особенности распределения ХОП и ПХБ в почвах в зависимости от типа растительности и содержания органического вещества (ОВ) в пределах ограниченной территории, чтобы минимизировать влияние указанных выше факторов.

Объекты и методы исследования

Для исследований выбран о. Ольхон (рис. 1), где основным источником поступления СОЗ является атмосферный перенос [6, 7]. Остров

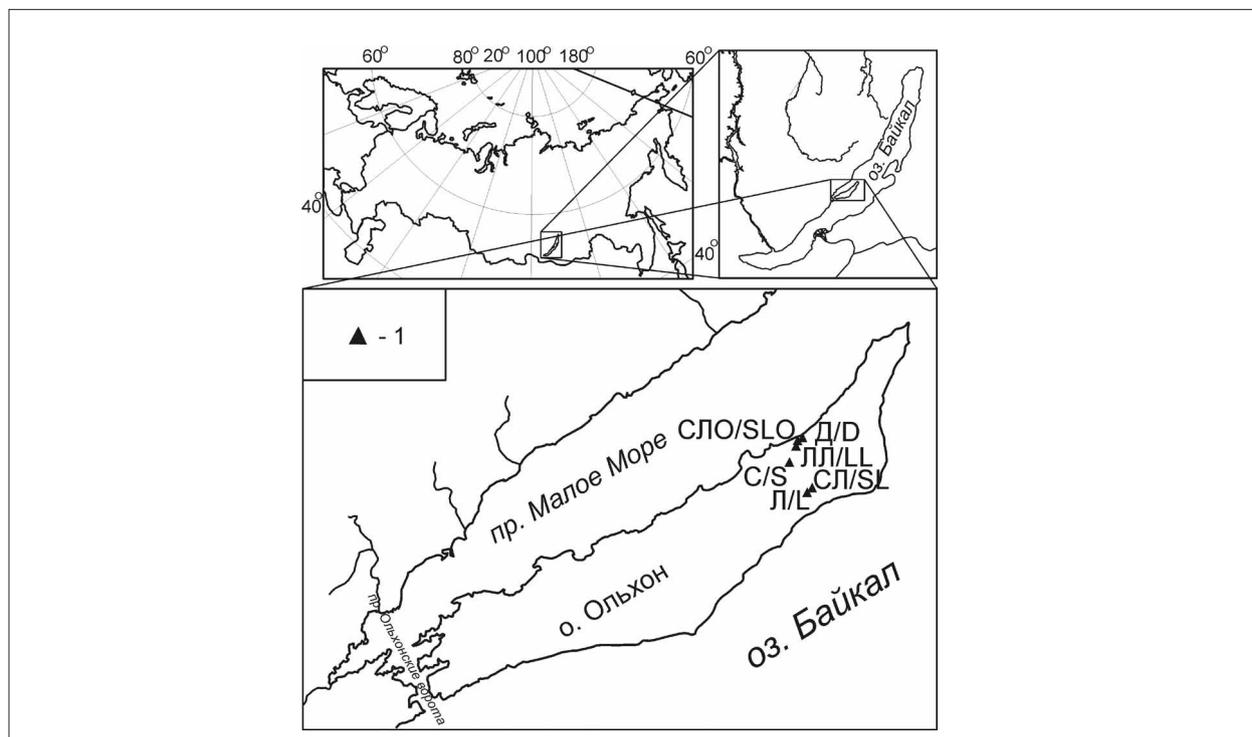


Рис. 1. Карта-схема района исследования: 1 – место отбора проб, Д – Нурганский песчаный массив (дюны) и СЛЮ – Нурганский песчаный массив (сосновый лес на останцах), ЛЛ – лиственничный лес, Л – луг в сосновом лесу, С – степь и СЛ – сосновый лес / **Fig. 1.** The schematic map of the investigation area: 1 – site of sampling, D – Nurgan sandy massif (dune), SLO – Nurgan sandy massif (pine forest on outliers), LL – larch forest, SL – pine forest, L – meadow, S – steppe

Таблица 1 / Table 1

Описание мест отбора проб / The description of sites of sampling

Название мест отбора Title of site of sampling		Координаты средней точки Coordinates of median site	Комплекс растительности Complex of vegetation	Цвет почвы Color of soil [13]	Плотность, г/см ³ Density, g/cm ³
Нюрганский песчаный массив (песок) Nurgan sandy massif (sand)	Д/Д	53°16'52,7'' 107°34'40,0''	Псаммофитный (на дюнах) Psammophyte (on the dunes)	10YR 7/4	<u>1,74</u> 1,72–1,76
Нюрганский песчаный массив (сосновый лес на останцах) Nurgan sandy massif (pine forest on outliers)	СЛО/ SLO	53°16'55,6'' 107°34'39,7''	Псаммофитный (на останцах) Psammophyte (on the remnants)	10YR 6/3 10YR 2/2	<u>1,17</u> 0,91–1,38
Лиственничный лес Larch forest	ЛЛ/ LL	53°16'37,7'' 107°34'04,9''	Лесной Forest	10YR 2/1	<u>0,41</u> 0,30–0,52
Сосновый лес Pine forest	СЛ/ SL	53°13'15,88'' 107°35'33,47''	Таёжный светлохвойный Taiga light coniferous	10YR 1.7/1	0,46
Луг Meadow	Л/Л	53°13'13,7'' 107°35'25,7''	Луговой Meadow	10YR 2/2	<u>0,53</u> 0,51–0,56
Степь Steppe	С/С	53°15'12,1'' 107°33'36,6''	Степной Steppe	10YR 3/4	<u>1,21</u> 1,20–1,22

Ольхон, самый крупный остров озера Байкал, отделён от западного побережья Байкала проливами Малое Море и Ольхонские ворота. Климат острова семиаридный с умеренно тёплым летом и умеренно суровой малоснежной зимой [8]. Выбор о. Ольхон для исследования также обусловлен разнообразием типов почв и растительных сообществ. На значительных площадях распространены горные дерновые лесные, подзолистые и дерново-подзолистые почвы. В наиболее засушливых местах в юго-западной части и на северной оконечности острова преобладают горно-каштановые глубокопромерзающие почвы. Каштановые почвы соседствуют с дерновыми лесными под степными лиственничниками [9]. На отдельных участках западного побережья острова сформировались песчаные массивы [10].

Растительность Ольхона представляет собой сложное образование, формирующееся под воздействием рельефа и климата, и состоит из комплексов фитоценозов степного, псаммофитного и лесного типов [10].

Псаммофитные сообщества формируются на современных эоловых образованиях [10], из которых наиболее мощным по развитию дефляционных процессов является Нюрганский песчаный подрайон. Высокие останцы массива покрыты одиночными деревьями или группами деревьев, в основном сосной обыкновенной [10]. Самые высокие подвижные дюны лишены растительности.

На подветренных склонах низких дюн развиваются сообщества и группировки тимьянового и разнотравно-хамеродосового рядов, а также сообщества овсяницевого и осоковые [10].

В западной части острова распространены типичные злаково-тырсовые и типчковые степи в сочетании с лугами, редкими остепнёнными сосняками и развееваемыми песками, в восточной и центральной частях – сосново-лиственничные, лиственничные, сосновые и лиственнично-сосновые остепнённые леса с богатым подлеском из багульника, рододендрона даурского, ольхи и караганы [9].

Отбор проб почв. Пробы почв были отобраны в августе 2015 г. в удалённых от дорог и туристических маршрутов районах острова. Для исследования были выбраны Нюрганский песчаный массив – дюны (Д) и сосновый лес на останцах (СЛО), лиственничный лес (ЛЛ), луг в сосновом лесу (Л), степь (С) и сосновый лес (СЛ) (табл. 1). В первых четырёх районах отобрано по 5 смешанных проб, в степи – 4, в сосновом лесу – 1 смешанная проба. Расстояние между точками отбора составляло 15 м. Каждая смешанная проба составлялась на месте отбора из 5 проб, отобранных методом конверта со стороной квадрата 1 м. При отборе использовали металлический пробоотборник-лопатку. Глубина отбора – 5 см. До анализа пробы хранились при температуре –30 °С.

Анализ проб производился в Институте геохимии им. А.П. Виноградова СО РАН. До анализа пробы почв были высушены при комнатной температуре до постоянного веса. На анализ бралась фракция меньше 2 мм. Пробоподготовка образцов почв включала экстракцию в аппаратах Сокслетта смесью ацетон:гексан (1:1) в течение 8 ч; очистку с использованием геляпроникающей хроматографии (Bio-Beads S-X3) и Al-Si-колонки; упаривание в токе азота до 0,1 мл. В каждой пробе были определены 43 конгенера ПХБ, включая индикаторные ПХБ (№№ ИЮПАК 28, 52, 101, 138, 153, 180), пара, пара'-ДДТ (p,p'-ДДТ, далее ДДТ), пара, пара'-дихлордифенилдихлорэтан (p,p'-ДДД, далее ДДД), пара, пара'-дихлордифенилдихлорэтилен (p,p'-ДДЭ, далее ДДЭ), α-ГХЦГ, γ-ГХЦГ и ГХБ. Анализ производился с использованием газового хроматографа (ГХ) HP 5890 series II GC, совмещённого с детектором электронного захвата (ДЭЗ) и оснащённого капиллярной колонкой DB-5, 0,25 мкм длиной 60 м (J&W Scientific) [6, 11]. Качество анализа проверялось с использованием сертифицированных референтных материалов CRM814 и CRM962.

Содержание органического углерода ($C_{орг}$), органического азота ($N_{орг}$), органического фосфора ($P_{орг}$) в почвах определялось персульфатным окислением, методом Кьельдаля и сжиганием с персульфатом калия [12], соответственно, а цветность – по колористическим таблицам [13].

Расчёты показателей канцерогенных и неканцерогенных рисков (индивидуальный

канцерогенный риск ИКР и индекс опасности) для здоровья человека от воздействия исследованных СОЗ в почвах проводили в соответствии с Руководством по оценке риска здоровья населения [14].

Статистический анализ результатов, включающий **t-тест** и **факторный анализ** данных, выполнен с использованием программы STATISTICA-6.

Результаты и обсуждение

Содержание $C_{орг}$, $N_{орг}$ и $P_{орг}$ в исследованных почвах изменялось в следующих пределах: 0,16–9,44, 0,006–1,022 и 0,004–0,204% соответственно. Наибольшее содержание $C_{орг}$, $N_{орг}$ и $P_{орг}$ найдено в луговых почвах (Л), на втором месте – почвы лиственного леса (ЛЛ), наименьшее содержание $C_{орг}$, $N_{орг}$ и $P_{орг}$ – в песках дюн Нюрганского песчаного массива (Д). Бедность органического вещества (ОВ) почвы азотом наблюдается как в лесных экосистемах (СЛО+ЛЛ+СЛ), так и на открытых пространствах (Д+Л+С). Степень гумификации в обоих случаях невысокая. Минерализация $P_{орг}$ почвы происходит при С:Р меньше 200 [15]. Для исследованных почв соотношение С:Р достаточно высокое, т. е. для исследованного периода в большей степени происходит иммобилизация Р (для Д+Л+С в меньшей степени, чем для СЛО+ЛЛ+СЛ). Высокие величины С:Р в почве свидетельствуют, что между растениями и микроорганизмами возможна конкуренция за фосфор. Р-лимитацию подтверждает значение отношения N:P > 16 в почвах СЛО, ЛЛ, СЛ и Л [16] (табл. 2).

Таблица 2 / Table 2

$C_{орг}$, $N_{орг}$, $P_{орг}$ (%) и их отношения (в атомах) в исследованных пробах
 $C_{орг}$, $N_{орг}$, $P_{орг}$ (%) and its ratios (in atoms) in investigated soils

Место отбора Sit of sampling	$C_{орг} / C_{орг}$	$N_{орг} / N_{орг}$	$P_{орг} / P_{орг}$	C:N	C:P	N:P
Д/D	<u>0.26</u> 0,16–0,40	<u>0.026</u> 0,006–0,052	<u>0.005</u> 0,004–0,007	<u>24</u> 3,6–75	<u>139</u> 75–233	<u>12</u> 2,5–24
СЛО/SLO	<u>2.03</u> 0,75–4,66	<u>0.101</u> 0,056–0,185	<u>0.013</u> 0,007–0,020	<u>27</u> 4,7–46	<u>457</u> 221–1228	<u>22</u> 7,5–56
ЛЛ/LL	<u>5.13</u> 3,40–7,34	<u>0.458</u> 0,257–0,606	<u>0.040</u> 0,004–0,085	<u>13</u> 10–16	<u>674</u> 204–2115	<u>47</u> 13–132
Л/L	<u>7.45</u> 6,46–9,44	<u>0.952</u> 0,858–1,022	<u>0.060</u> 0,016–0,204	<u>9</u> 7,9–11	<u>672</u> 120–1257	<u>77</u> 11–140
СЛ/SL	<u>3.93</u>	<u>0.229</u>	<u>0.031</u>	<u>20</u>	<u>331</u>	<u>16</u>
С/S	<u>1.81</u> 1,65–1,96	<u>0.114</u> 0,103–0,124	<u>0.017</u> 0,015–0,018	<u>18</u> 16–19	<u>278</u> 239–320	<u>15</u> 13–16

Примечание: в числителе приведены средние значения, в знаменателе – min-max; обозначение местности отбора проб в соответствии с таблицей 1.

Note: numerator is an average, denominator is the min-max range; the marking of sampling sites in according to table 1.

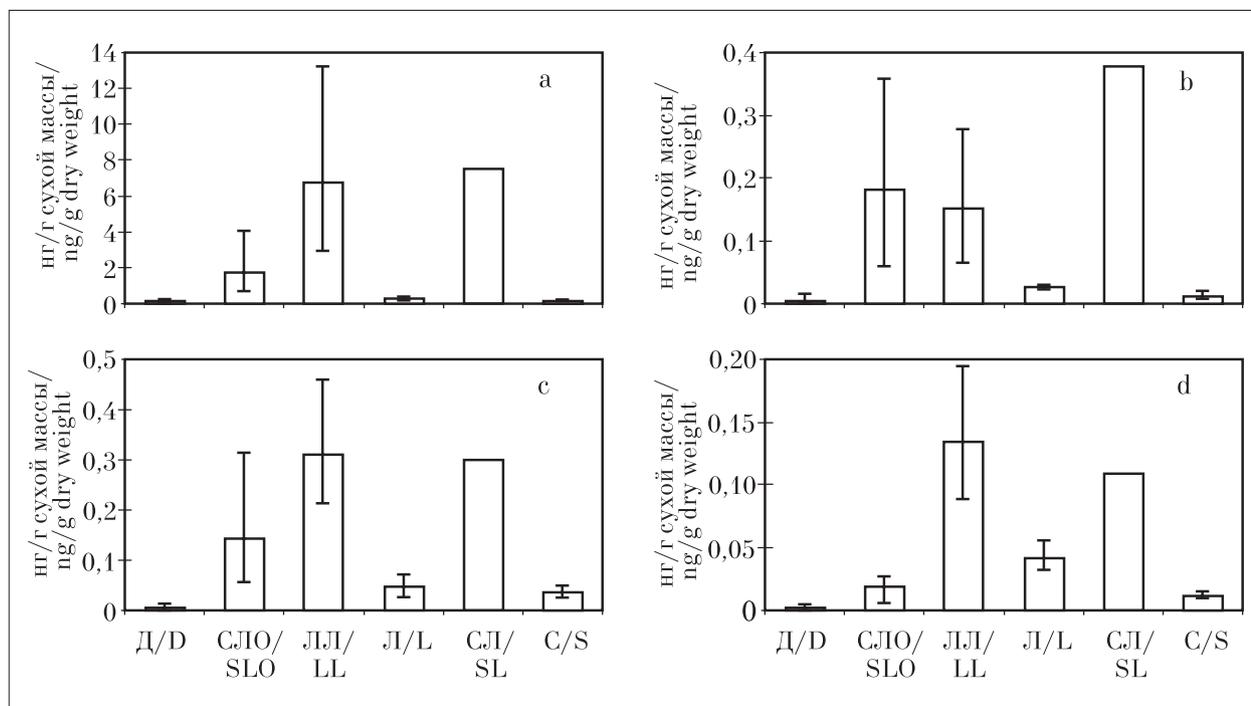


Рис. 2. Средние, минимальные и максимальные концентрации ГХБ (а), α -ГХЦГ (б), p,p' -ДДЭ (с) и ПХБ-153 (д) в почвах о. Ольхон (нг/г сухой массы).
Fig. 2. Mean, minimal and maximal levels of HCB (a), α -HCH (b), p,p' -DDE (c) and PCB-153 (d) in soil of Olkhon Islands (ng/g dry weight)

Разница между максимальным и минимальным содержаниями $C_{орг}$, $N_{орг}$ и $P_{орг}$ в исследованных почвах о. Ольхон значительная (60, 165 и 255 раз соответственно), что позволяет оценить влияние элементного состава ОВ почвы на распределение СОЗ.

Содержание СОЗ в почвах изменялось в следующих пределах: ГХБ – $< 0,008$ –13,2, сумма α - и γ -изомеров ГХЦГ – $< 0,003$ –0,51, сумма ДДТ и его метаболитов – $< 0,005$ –1,17, сумма всех 42 исследованных конгенов ПХБ – $< 0,059$ –2,710 и сумма 6 индикаторных конгенов ПХБ – 0,017–0,780 нг/г сухой массы. Данные величины соответствуют уровням, обнаруженным в фоновых почвах других регионов мира (ПХБ – 5,41 (0,026–96), ГХБ – 0,68 (0,010–5,21) [3], ГХЦГ – 1,86 (0,43–6,72), ДДТ – 1,63 (0,29–4,34) нг/г [17]).

Уровни содержания СОЗ в почвах различались в зависимости от места отбора (рис. 2, табл. 3). Наибольшие концентрации найдены в почвах соснового и лиственничного лесов. Наименьшие – в песке дюн Нюрганского песчаного массива и почвах степи. Уровни СОЗ в почвах в сосновом лесу на останцах песчаного массива были всегда выше, чем в песках дюн, но ниже, чем в почвах лиственничного и соснового лесов. Концентрации СОЗ в луговой почве были ниже, чем в почве соснового леса, расположенного рядом. Различия в содержа-

нии СОЗ в почвах лесных комплексов и на открытых пространствах были статистически достоверны (табл. 3). Также отмечена разница в качественном составе СОЗ в почвах. Так, отношение (ДДД+ДДЭ)/ДДТ было меньше 1 в лесных почвах, тогда как в степных и луговых почвах – больше 1, в песках дюн оно изменялось от 0,76 до 2,4. Относительный гомологический состав ПХБ также различается: доля тетрахлорбифенилов выше в песках дюн, луговой и степной почвах, чем в лесных почвах, а доля гексахлорбифенилов – наоборот выше в лесных почвах (рис. 3).

Влияние древесной растительности на особенности накопления СОЗ в почвах подтверждается также факторным анализом (рис. 4). На содержание СОЗ в почвах открытых пространств (Д+С+Л) оказывает преимущественное влияние прямое сухое газообразное, и сухое, и влажное (дождь, снег) осаждение СОЗ из атмосферного воздуха (фактор I). В случае с территориями, покрытыми древесной растительностью (СЛО+ЛЛ+СЛ), накопление СОЗ в большей степени определяется наличием лесного покрова (фактор II). Хвоя сосны и лиственницы в данном случае является значительным фактором поступления СОЗ в почвы. Известно, что леса служат эффективными фильтраторами взвешенных частиц воздуха [18]. Однако было показано [4], что

Таблица 3 / Table 3

Среднее содержание отдельных СОЗ в почвах о. Ольхон (нг/г) и достоверность различия средних в группах по t-критерию (p) / The mean content of some POPs in soils of Olkhon Island (ng/g) and reliability of difference of averages in groups according to t-criterion (p)

Место отбора Sit of sampling	Среднее содержание, нг/г Mean, ng/g	Достоверность различия средних в группах, p Reliability of difference of means in groups, p					
		Д/D	СЛО/SLO	ЛЛ/LL	Л/L	СЛ/SL	С/S
<i>ГХБ/НСВ</i>							
Д/D	0,01		0,018	0,010	<0,001	<0,001	0,001
СЛО/SLO	1,76	0,018		0,044	0,038	0,016	0,037
ЛЛ/LL	6,73	0,010	0,044		0,012	–	0,022
Л/L	0,30	<0,001	0,038	0,012		<0,001	<0,001
СЛ/SL	7,51	<0,001	0,016	–*	<0,001		<0,001
С/S	0,04	0,001	0,037	0,022	<0,001	<0,001	
<i>α-ГХЦГ/α-НСН</i>							
Д/D	0,01		0,029	0,005	<0,001	<0,001	–
СЛО/SLO	0,18	0,029		–	0,047	–	–
ЛЛ/LL	0,15	0,005	–		0,010	–	0,014
Л/L	0,03	<0,001	0,047	0,010		<0,001	0,002
СЛ/SL	0,38	<0,001	–	–	<0,001		<0,001
С/S	0,01	–	–	0,014	0,002	<0,001	
<i>p,p' –ДДЭ/p,p' –DDE</i>							
Д/D	0,01		0,017	<0,001	0,002	<0,001	0,001
СЛО/SLO	0,14	0,017		0,032	–	–	–
ЛЛ/LL	0,31	<0,001	0,032		<0,001	–	0,001
Л/L	0,05	0,002	–	<0,001		<0,001	–
СЛ/SL	0,30	<0,001	–	–	<0,001		<0,001
С/S	0,04	0,001	–	0,001	–	<0,001	
<i>ΣПХБ₆/ΣPCB₆</i>							
Д/D	0,02		0,001	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001
СЛО/SLO	0,11	0,001		<0,001	<0,001	<0,001	0,045
ЛЛ/LL	0,54	<0,001	<0,001		0,006	–	<0,001
Л/L	0,25	<0,001	<0,001	0,006		0,017	<0,001
СЛ/SL	0,46	<0,001	<0,001	–	0,017		<0,001
С/S	0,06	<0,001	0,045	<0,001	<0,001	<0,001	

Примечание: * – отсутствие достоверного различия средних в группах; обозначение местности отбора проб в соответствии с таблицей 1.

Note: * – no significant difference in mean between groups; the marking of sampling sites in according to table 1.

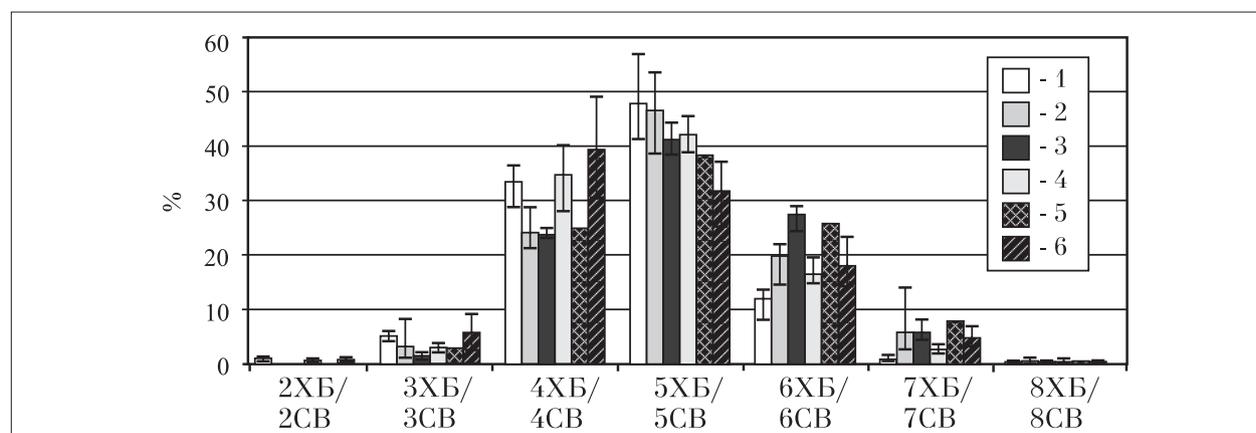


Рис. 3. Относительный гомологический состав ПХБ (%) в почвах о. Ольхон: 1 – Д, 2 – СЛО, 3 – ЛЛ, 4 – Л, 5 – СЛ, 6 – С / Fig. 3. The relative homologous composition of PCB (%) in soil of Olkhon Island 1 – D, 2 – SLO, 3 – LL, 4 – L, 5 – SL, 6 – S

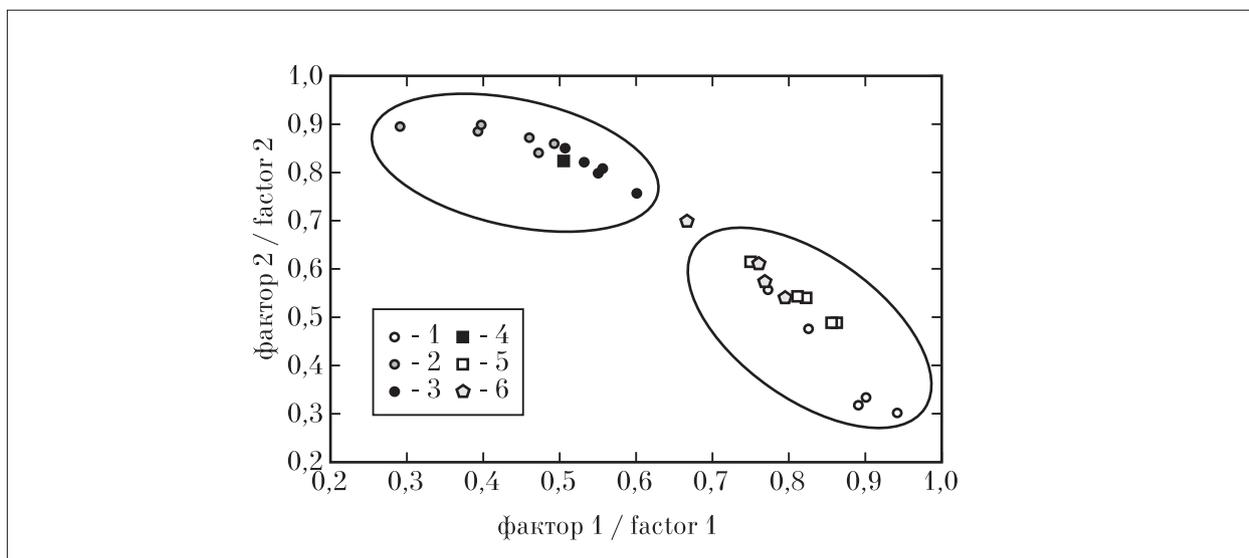


Рис. 4. Группировка проб по результатам факторного анализа состава СОЗ: 1 – Д, 2 – СЛО, 3 – ЛЛ, 4 – Л, 5 – СЛ, 6 – С / Fig. 4. The grouping of samples under results of factor analysis of POP composition: 1 – D, 2 – SLO, 3 – LL, 4 – L, 6 – S

при сухом газообразном осаждении фильтрующие свойства леса проявляются только для соединений с коэффициентом распределения октанол-воздух ($\log K_{oa}$) от 7 до 11, т. е. для так называемых «полуволетучих органических соединений» («semivolatile compounds»), к которым относятся также ПХБ и ХОП. Сначала они адсорбируются на поверхности листа или диффундируют в кутикулу. Скорость адсорбции соединения на листе или хвое зависит от физико-химических свойств соединения, характеристик окружающей среды (температура и ветер), структуры и площади поверхности листа, содержания липидов в нём [19]. Далее СОЗ поступают в почву в результате опада отмерших листьев и хвои, а также при эрозии и сбросе воскового слоя листа, вызванного ветром или дождём [20].

Ещё одним фактором, который может оказывать влияние на содержание СОЗ в почвах, является органическое вещество. Был выполнен корреляционный анализ между содержанием СОЗ и органических С, N, P отдельно в лесных почвах и почвах открытых пространств, чтобы избежать влияния фактора различия лесных и травянистых комплексов растительности (табл. 4). Получена сильная статистически достоверная положительная корреляционная связь ($r > 0,7$ при $p < 0,05$) содержания практически всех индивидуальных СОЗ и их групп с содержанием C_{org} как в почвах открытых пространств (С+Л+Д), так и в почвах лесных территорий (СЛО+ЛЛ+СЛ), за исключением октахлорбифенилов (8ХБ) в обеих группах и α - и γ -изомеров ГХЦГ и p,p' -ДДД в лесных почвах. Связь содер-

жания СОЗ и C_{org} в почвах, полученная в нашем исследовании, значительно сильнее, чем в подобных исследованиях, проводимых на больших по размеру территориях [3, 5].

Кроме того, в настоящем исследовании впервые рассмотрена взаимосвязь содержания СОЗ и содержания N_{org} , P_{org} и отношений элементов ОВ (С:N, С:P, N:P) в лесных почвах и почвах открытых пространств. Достоверная положительная взаимосвязь в распределении N_{org} и P_{org} и практически всех изученных СОЗ найдена также в обеих группах почв, за исключением 8ХБ и некоторых пестицидов (табл. 4). Взаимосвязь распределения СОЗ с С:N в обеих группах почв, а также СОЗ и С:P и С:N в лесных почвах слабая и недостоверная. Тогда как в почвах открытых пространств взаимосвязь положительная и достоверная ($r = 0,488-0,803$ при $p < 0,05$).

Различие в накоплении СОЗ в почвах лесных, луговых и степных экосистем оказывает влияние и на результаты расчётов риска для здоровья населения. При случайном пероральном поступлении частиц почвы в организм человека (примерно 50 мг/день в течение всей жизни) с концентрациями СОЗ в лесных почвах, найденными в нашем исследовании, показатели индивидуального канцерогенного риска (ИКР) будут в 7–22 раза выше, а индекс опасности в 2,4–7 раз выше, чем для луговых и степных почв. Показатели ИКР были значительно ниже пренебрежимо малых уровней риска ($1 \cdot 10^{-6}$), а индекс опасности значительно ниже единицы, превышение которой говорит о вероятности возникновения вредных

Таблица 4 / Table 4

Коэффициенты корреляции C, N, P и СОЗ / The coefficient of correlation between C, N, P and POPs

Место отбора проб Site of sampling	Д+С+Л D+S+L	СЛО+ЛЛ+ СЛ SLO+LL+ SL	Д+С+Л D+S+L	СЛО+ЛЛ+ СЛ SLO+LL+ SL	Д+С+Л D+S+L	СЛО+ЛЛ+ СЛ SLO+LL+ SL
Показатели	C_{opr} / C_{org}		N_{opr} / N_{org}		P_{opr} / P_{org}	
ГХБ / HCB	0,957*	0,777	0,964	0,667	0,815	0,770
α -ГХЦГ / α -HCH	0,866	0,398	0,865	0,171	0,685	0,254
γ -ГХЦГ / γ -HCH	0,705	0,414	0,708	0,172	0,526	0,269
ДДД / DDD	0,817	0,511	0,860	0,221	0,611	0,326
ДДЭ / DDE	0,867	0,806	0,798	0,846	0,692	0,442
ДДТ / DDT	0,905	0,781	0,872	0,447	0,666	0,618
2ХБ / 2CB	0,868	–**	0,869	–	0,792	–
3ХБ / 3CB	0,869	0,803	0,852	0,675	0,758	0,452
4ХБ / 4CB	0,955	0,889	0,927	0,889	0,822	0,631
5ХБ / 5CB	0,914	0,894	0,920	0,843	0,741	0,643
6ХБ / 6CB	0,970	0,851	0,928	0,869	0,810	0,644
7ХБ / 7CB	0,959	0,952	0,889	0,768	0,805	0,557
8ХБ / 8CB	0,586	0,610	0,572	0,690	0,259	0,511
Σ ПХБ ₄₀ / Σ PCB ₄₀	0,960	0,904	0,941	0,869	0,802	0,634
Σ ПХБ ₆ / Σ PCB ₆	0,960	0,871	0,944	0,879	0,794	0,618

Примечание: * – жирным шрифтом выделены коэффициенты корреляции с уровнем значимости $p < 0,05$; ** – нет данных; обозначение местности отбора проб в соответствии с таблицей 1.

Note: * – correlation coefficients with significance level $p < 0.05$ are highlighted by bold type; ** – no data; the marking of sampling sites in according to table 1.

эффектов у человека. Индексы опасности для органов и систем-мишеней изменялись от $2,7 \cdot 10^{-6}$ до $8,6 \cdot 10^{-5}$, а ИКР – от $1,4 \cdot 10^{-10}$ до $1,1 \cdot 10^{-8}$. Для исследованных в данной работе фоновых территорий это означает пренебрежимо малый уровень риска, однако на территориях с высоким уровнем выпадения СОЗ различие между лесными и луговыми или степными участками необходимо учитывать при оценке риска для здоровья человека.

Заключение

Определено содержание органического вещества, его элементного состава и стойких органических загрязнителей в почвах разных фитоценозов на фоновой территории на о. Ольхон (Байкал).

Получена сильная статистически достоверная положительная корреляционная зависимость между содержанием практически всех индивидуальных СОЗ и их групп и C_{opr} , N_{opr} и P_{opr} как в почвах открытых пространств, так и в почвах лесных территорий.

Уровни содержания СОЗ и их качественный состав в почвах статистически различались в

зависимости от фитоценоза на месте отбора. На содержание СОЗ в почвах открытых пространств (дюны, степь, луг) оказывает преимущественное влияние прямое сухое газообразное, сухое посредством частиц, и влажное (дождь, снег) осаждение СОЗ из атмосферного воздуха. Для территорий, покрытых древесной растительностью, накопление СОЗ в большей степени находится под влиянием лесного покрова.

Подтверждено, что леса служат более эффективными адсорбентами СОЗ из атмосферного воздуха, по сравнению с растительностью открытых пространств, а лесная почва накапливает больше СОЗ по сравнению с почвами открытых пространств.

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке гранта РФФИ 15-05-00896 и в рамках выполнения государственного задания по проекту IX.127.1.2. (0350-2016-0026) .

Литература

1. AMAP Assessment Report: Arctic Pollution Issues. Arctic Monitoring and Assessment Program (AMAP). Oslo, 1998. 859 p.

2. AMAP Assessment Report: Persistent toxic substances, food security and indigenous people of the Russian North. Arctic Monitoring and Assessment Program (AMAP). Oslo, 2004. 192 p.

3. Meijer S.N., Ockenden W.A., Sweetman A., Breivik K., Grimalt J.O., Jones K.C. Global distribution and budget of PCBs and HCB in background surface soils: implications for sources and environmental processes // *Environmental Science and Technology*. 2003. V. 37. P. 667–672.

4. McLachlan M.S., Horstmann M. Forests as filters of airborne organic pollutants: a model // *Environ. Sci. Technol.* 1998. V. 32. P. 413–420.

5. Sweetman A.J., Dalla Valle M., Prevedouros K., Jones K.C. The role of soil organic carbon in the global cycling of persistent organic pollutants (POPs): interpreting and modelling field data // *Chemosphere*. 2005. V. 60. P. 959–972.

6. Полихлорированные бифенилы (ПХБ) в Байкальском регионе: источники, дальний перенос и оценка риска (результаты гранта INTAS 2000-00140). Иркутск: Изд-во ИГ СО РАН, 2005. 52 с.

7. Мамонтова Е.А., Тарасова Е.Н., Кузьмин М.И., Борисов Б.З., Бульбан А.П., Левшина С.И., Лепская Е.В., Трегубов О.Д., Юрченко С.Г., Мамонтов А.А. Распределение стойких органических загрязнителей в системе почва – атмосферный воздух в Сибири и на Дальнем Востоке // *Геоэкология*. 2014. № 5. С. 418–428.

8. Атлас. Иркутская область: экологические условия развития. Иркутск: Институт географии СО РАН, 2004. 90 с.

9. Беркин Н.С., Филиппова С.А., Бояркин В.М., Наумова А.М., Руденко Г.В. Иркутская область (природные условия административных районов). Иркутск: Изд-во Иркут. ун-та, 1993. 304 с.

10. Касьянова Л.Н., Азовский М.Г., Мазукабов А.М. Структура растительности перевеваемых песковой острова Ольхон (озеро Байкал) // *Бюл. Моск. о-ва испытателей природы. Отд. Биол.* 2007. Т. 112. Вып. 2. С. 41–49.

11. Mamontova E.A., Tarasova E.N., Mamontov A.A., Kuzmin M.I., McLachlan M.S., Khomutova M.Iu. The influence of soil contamination on the concentrations of PCBs in milk in Siberia // *Chemosphere*. 2007. V. 67. P. S71–S78.

12. Теория и практика химического анализа почв. М.: ГЕОС, 2006. 400 с.

13. Munsell soil-color charts with genuine Munsell color chips. Grand Rapids, MI, USA: Munsell color X-rite, 2013.

14. Р 2.3.10.1920-04. Руководство по оценке риска для здоровья населения при воздействии химических веществ, загрязняющих окружающую среду. М.: Федеральный центр госсанэпиднадзора Минздрава России, 2004. 143 с.

15. Black C.A., Goring C.A.I. Organic phosphorus in soils / *Soil and Fertilizer Phosphorus in soils*. ASA, Madison, WI. 1953. P. 123–152.

16. Cleveland C.C., Liptzin D. C:N:P stoichiometry in soil: is there a “Redfield ratio” for the microbial biomass? // *Biogeochemistry*. 2007. V. 85. P. 235–252.

17. Gai N., Pan J., Tang H., Chen S., Chen D., Zhu X., Lu G., Yang Y. Organochlorine pesticides and polychlorinated biphenyls in surface soils from Ruergai high altitude prairie, east edge of Qinghai-Tibet Plateau // *Science of the Total Environment*. 2014. V. 478. P. 90–97.

18. Jonas R., Heinemann K. Studies on the dry deposition of aerosol particles on vegetation and plane surfaces // *J. Aerosol Sci.* 1985. V. 16. P. 463–471.

19. Bakker M., Tolls J., Kolloff C. Deposition of atmospheric semivolatile organic compounds to vegetation // *Persistent, bioaccumulative and toxic chemicals I: Fate and exposure*. 2000. Chapter 16. P. 218–236.

20. Horstmann M., McLachlan M.S. Evidence of a novel mechanism of semivolatile organic compound deposition in coniferous forests. *Environ. Sci. Technol.* 1996. V. 30. P. 1794–1796.

References

1. AMAP Assessment Report: Arctic Pollution Issues. Arctic Monitoring and Assessment Program (AMAP). Oslo, 1998. 859 p.

2. AMAP Assessment Report: Persistent toxic substances, food security and indigenous people of the Russian North. Arctic Monitoring and Assessment Program (AMAP). Oslo, 2004. 192 p.

3. Meijer S.N., Ockenden W.A., Sweetman A., Breivik K., Grimalt J.O., Jones K.C. Global distribution and budget of PCBs and HCB in background surface soils: implications for sources and environmental processes // *Environmental Science and Technology*. 2003. V. 37. P. 667–672.

4. McLachlan M.S., Horstmann M. Forests as filters of airborne organic pollutants: a model // *Environ. Sci. Technol.* 1998. V. 32. P. 413–420.

5. Sweetman A.J., Dalla Valle M., Prevedouros K., Jones K.C. The role of soil organic carbon in the global cycling of persistent organic pollutants (POPs): interpreting and modelling field data // *Chemosphere*. 2005. V. 60. P. 959–972.

6. Polychlorinated biphenyls (PCB) in the Lake Baikal region: sources, long rang transport and risk assessment (results of grant INTAS 2000-00140). Irkutsk: Izdatelstvo IG SO RAN, 2005. 52 p. (in Russian).

7. Mamontova E.A., Tarasova E.N., Kuzmin M.I., Borisov B.Z., Bulban A.P., Levshina S.I., Lepskaya E.V., Tregubov O.D., Yurchenko S.G., Mamontov A.A. The distribution of persistent organic pollutants in system of soil – atmospheric air in Siberia and Far East // *Geoekologiya*. 2014. No. 5. P. 418–428 (in Russian).

8. Atlas. Irkutsk Oblast: ecological conditions of development. Irkutsk, 2004. 90 p. (in Russian).

9. Berkin N.S., Filippova S.A., Boyarkin V.M., Naumova A.M., Rudenko G.V. Irkutsk Oblast (natural

conditions in administrative districts). Irkutsk: Izd-vo Irkutskogo universiteta, 1993. 304 p. (in Russian).

10. Kasyanova L.N., Azovskiy M.G., Makukabzov A.M. The structure of flora of dune sands of the Olkhon Island (Lake Baikal) // Bulletin Moskovskogo obshchestva ispytateley prirody. Otdelenie biologii. 2007. V. 112. No. 2. P. 41–49 (in Russian).

11. Mamontova E.A., Tarasova E.N., Mamontov A.A., Kuzmin M.I., McLachlan M.S., Khomutova M.Iu. The influence of soil contamination on the concentrations of PCBs in milk in Siberia // Chemosphere. 2007. V. 67. P. S71–S78.

12. Theory and practice of chemical analysis of soil. Moskva: GEOS, 2006. 400 p. (in Russian).

13. Munsell soil-color charts with genuine Munsell color chips. Grand Rapids, MI, USA: Munsell color X-rite, 2013.

14. Handbook on human health risk assessment under influence of chemical substances contaminating an environment gtht R 2.3.10.1920-04. Moskva: Federalnyy tsentr gossanepidnadzora Minzdrava Rossii, 2004. 143 p. (in Russian).

15. Black C.A., Goring C.A.I. Organic phosphorus in soils / Soil and Fertilizer Phosphorus in soils. ASA, Madison, WI. 1953. P. 123–152.

16. Cleveland C.C., Liptzin D. C:N:P stoichiometry in soil: is there a “Redfield ratio” for the microbial biomass? // Biogeochemistry. 2007. V. 85. P. 235–252.

17. Gai N., Pan J., Tang H., Chen S., Chen D., Zhu X., Lu G., Yang Y. Organochlorine pesticides and polychlorinated biphenyls in surface soils from Ruoergai high altitude prairie, east edge of Qinghai-Tibet Plateau // Science of the Total Environment. 2014. V. 478. P. 90–97.

18. Jonas R., Heinemann K. Studies on the dry deposition of aerosol particles on vegetation and plane surfaces // J. Aerosol Sci. 1985. V. 16. P. 463–471.

19. Bakker M., Tolls J., Kolloffel C. Deposition of atmospheric semivolatile organic compounds to vegetation // Persistent, bioaccumulative and toxic chemicals I: Fate and exposure. 2000. Chapter 16. P. 218–236.

20. Horstmann M., McLachlan M.S. Evidence of a novel mechanism of semivolatile organic compound deposition in coniferous forests. Environ. Sci. Technol. 1996. V. 30. P. 1794–1796.

УДК 543.3

Накопление фторсодержащих соединений в почвах придорожных территорий Московской области

© 2018. Д. Б. Петренко¹, старший преподаватель,
Н. В. Корсакова², к. х. н., с. н. с.,

Н. В. Васильев¹, д. х. н., профессор, заведующий кафедрой,

¹Московский государственный областной университет,
141014, Россия, Московская область, г. Мытищи, ул. Веры Волошиной, 24,

²Институт геохимии и аналитической химии им. В. И. Вернадского РАН,
119991, Россия, г. Москва, ул. Косыгина, 19,

e-mail: DBPetrenko@yandex.ru, kaf-obhim@mgou.ru, nikolai-vasiliev@mail.ru

Осуществлена оценка содержания фтора в почвах придорожных территорий Московской области по сети наблюдений, включающей 13 участков, прилегающих к автомобильным дорогам. Установлено, что концентрации фтора в почвах придорожных территорий Московской области на всех исследованных участках превышают фоновое значение, что позволяет говорить об их загрязнённости. В среднем превышение составляет 3,4 раза, максимальное превышение достигает 6,3 раза. Загрязнение фтором исследованных участков в большинстве случаев является достаточно равномерным. Максимальные концентрации фтора обнаружены в верхнем слое почв на глубинах до 10–15 см и существенно снижаются, достигая фоновых на глубинах 25–30 см. На примере участка, прилегающего к Фряновскому шоссе, выявлено монотонное снижение концентраций фтора в почвах при удалении от автомагистрали, что подтверждает причинно-следственную связь выбросов автотранспорта с загрязнением фтором придорожных территорий Московской области.

Ключевые слова: фтор, почвы, экология, Московская область, придорожные территории, автотранспорт.

Accumulation of fluorine-containing compounds in soils of roadside territories in the Moscow Region

D. B. Petrenko¹, N. V. Korsakova², N. V. Vasiliev¹,

¹ Moscow State Regional University,

24 V. Voloshinoy St., Mytitschi, Moscow Region, Russia, 141014,

² Vernadsky Institute of Geochemistry and

Analytical Chemistry of Russian Academy of Sciences,

19, Kosygina St., Moscow, Russia, 119991,

e-mail: DBPetrenko@yandex.ru, kaf-obhim@mgou.ru, nikolai-vasiliev@mail.ru

The results of an estimation of the fluorine content in the soils of the roadside territories of the Moscow Region are given. They have been obtained from the observation network including 13 sites adjacent to the roads. Determination of fluorine was carried out by ionometric method after sample preparation which included fusion of samples with a mixture of sodium carbonate and sodium tetraborate and subsequent dissolution of the melt in 3 mol/dm³ hydrochloric acid. It has been established that the concentrations of fluorine in the soils of the roadside territories of the Moscow Region in all the investigated areas exceed the background value, which shows their high pollution. On average, the excess is 3.4 times, the maximum exceeds 6.3 times. Fluoride contamination of the investigated sites in most cases is fairly evenly. The fluorine content in the surveyed points in the overwhelming majority of cases differs from the average content over the site by no more than 25%. Maximum concentrations of fluorine are found in the upper layer of soil at depth of 10–15 cm, and they decrease significantly, reaching background in depth of 25–30 cm. It is noted that there is no correlation between the geographic location of the site and the fluorine content in soils in various directions of the Moscow Region. On the example of the area adjacent to the Fryanovskoye Highway, a monotonous decrease in fluorine concentrations in soils was detected when moving away from the highway, which confirms the causal relationship of motor vehicle emissions with pollution of roadside territories of the Moscow Region with fluorine. Thus, the most likely source of fluoride contamination in the roadside territories is the exhaust gases of vehicles and the decomposition of freons contained in the air conditioning systems of automotive equipment.

Keywords: fluorine, soil, ecology, Moscow Region, roadside territories, motor transport.

Фтор, относящийся к токсикантам промышленного типа, имеет ряд особенностей, обуславливающих его геохимическое и биогеохимическое поведение и определяющих его существенные отличия в природных условиях от других галогенов. Здесь и далее термин «фтор» используется для оценки совокупного содержания, миграций элемента фтора, вне зависимости от его формы существования в данном объекте: в виде фторид-аниона, комплексного соединения, фторорганического соединения. Пониженная талассофильность и повышенная литофильность фтора приводят к его накоплению в низкозалегающих горизонтах почв. При этом фоновое содержание фтора в верхних слоях почв мира находится в районе 320 мг/кг [1], а недопустимые концентрации фтора, фиксирующиеся в ряде горнорудных промышленных регионах, могут составлять ≈ 2000 мг/кг [1, 2].

Основными источниками антропогенного поступления фтороводорода и фторидов в окружающую среду являются выбросы тепловых электростанций и автомобильного транспорта, производство алюминия, стекла и стекловолокна, минеральных удобрений, кирпича, цемента, производство фторированных веществ, включая мономеры и полимеры, фреоны и гексафторид серы (элегаз), лекарственные препараты и т. д. [3, 4].

Одной из основных особенностей биосферного поведения фтора является крайне невысокое разнообразие фторорганических соединений в природе. В настоящее время всего 7 монофторорганических соединений являются естественными метаболитами растений и грибов, и большинство из них токсично для животных [5]. Фтор, является необходимым микроэлементом для животных, но в дозах, отклоняющихся от средних (≈ 1 мг/л для питьевой воды), приводит к ряду заболеваний. Промышленное производство фторированных веществ постоянно растет, и антропогенное распространение фтора, безусловно, должно находиться под тщательным контролем, учитывая серьезное влияние его избыточных содержаний, вызывающих болезни опорно-двигательного аппарата и флюороз зубов [6, 7]. В рамках настоящей работы изучено распространение фтора в почвах Московской области, одного из наиболее динамично развивающихся промышленных и транспортных регионов России.

Материалы и методы

Отбор точечных проб почвы для определения фтора осуществляли по углам и в центре площадок 100 x 100 м, непосредственно при-

легающих к крупным автотранспортным магистралям на территории Московской области, с глубины 0–5 см в соответствии с рекомендациями, приведёнными в [8]. Для изучения динамики изменения концентраций фтора во времени отбирали пробы почвы на площадке, заложенной близ Ярославского шоссе (г. Мытищи) в мае 2012, 2014 и 2016 г. При необходимости изучения почвенного профиля отбирали пробы с различных глубин (до 2 м) при помощи бура-пробоотборника «ППБ». При подготовке к анализу пробы рассыпали на кальке и выбирали инородные включения. Затем пробы высушивали до воздушно-сухого состояния, просеивали через сито с размером ячеек 0,4 мм, высушивали при 105 °С до постоянной массы, истирали до крупности 200 меш. (меш – внесистемная единица измерения для проволочных сит). Содержание фтора в пробах определяли ионометрическим методом после их сплавления со смесью карбоната и тетрабората натрия с последующим растворением полученного плава в 3М хлороводородной кислоте в соответствии с авторами работы [9]. Для выполнения потенциометрических

измерений использовали электродную систему, состоящую из фторид-селективного электрода «ЭЛИТ-221» и вспомогательного хлорид-серебряного электрода ЭВЛ–1МЗ. Измерение потенциала фторидного электрода проводили с точностью ±0,1 мВ рН-метр/иономером «HANNA–221». Корректность выполнения определения фтора контролировали анализом стандартных образцов состава почвы ООКО–151, ООКО–152, ООКО–153, ила БИЛ–1 и горных пород СГД–1А и СГ–1А (содержание фтора составляет 360±40; 280±40; 210±20; 600±60; 1200±100; 3000±300 мг/кг соответственно) [10]. Полученные концентрации сравнивали с фоновыми, представленными в работе [1].

Обсуждение результатов

Соединения фтора поступают в атмосферу с выбросами промышленных производств, автотранспорта, а также в результате разложения фреонов, элегаза, фторированных лекарственных средств и фторсодержащих анестетиков и после минерализации в конечном



Рис. 1. Карта-схема отбора проб почвы на придорожных территориях Московской области
 Fig. 1. Map of sampling in the roadside territories of the Moscow region

Таблица 1 / Table 1

Содержание фтора в почвах придорожных территорий Московской области
Content of fluoride in the soils of the roadside territories of the Moscow Region (n = 3; P > 0,95)

№ участка area №	Наименование шоссе / highway	Содержание фтора, мг/кг / Fluorine content, mg/kg					Среднее значение Average
		Номер образца / Sample No.					
		1	2	3	4	5	
1	Ярославское Yaroslavskoye	930±50	1340±100	930±50	1520±75	1180±75	1180
2	Фрянновское (ул. Московская) Fryanovskoye (Moskovskaya Street)	1160±75	1360±120	1350±75	1720±120	1030±75	1324
3	Фрянновское (ул. Проспект Мира) Fryanovskoye (Prospect Mira)	1930±75	2330±100	1670±75	2520±100	1700±75	2030
4	Носовихинское Nosovikhinskoye	1340±100	930±50	760±50	1180±75	1520±75	1146
5	М4 Дон / M4 Don	670±100	1300±175	140±50	150±50	1170±75	686
6	Горьковское Gorkovskoye	380±40	800±50	670±55	980±55	680±40	702
7	Щелковское Schelkovskoye	1520±30	1170±30	1060±35	1550±40	1550±40	1370
8	Большевское Bolshevskoye	540±30	450±40	580±45	410±45	450±45	486
9	Осташковское Ostashkovskoye	1120±40	980±50	1360±120	1300±100	920±30	1136
10	Новорязанское Novoryazanskoye	2270±100	1170±75	1250±75	1430±75	1320±175	1488
11	Ленинградское Leningradskoye	340±40	360±40	390±30	350±50	470±30	382
12	Минское /Minskoye	1400±70	1100±75	1300±125	950±75	900±50	1130
Фоновое значение Background value [1]		320					

итоге попадают в почву и воду [11 – 14]. Ранее полученные данные анализа почв свидетельствуют о высокой загрязнённости фтором ряда территорий Московской области, особенно это касается придорожных территорий [12]. В продолжение систематических исследований делокализации фтора в Московском регионе нами выявлялись уровни загрязнения фтором по расширенной схеме наблюдений (рис. 1). Участки 1, 9, 10 и 11 находятся на границе Москвы и Московской области вблизи пересечений с Московской кольцевой автомобильной дорогой и характеризуются наиболее высокой интенсивностью движения. Участки 2, 3, 4, 6, 7, 8 находятся на северо-востоке от Москвы и удалены от неё на 15–40 км. Участки 5 и 12 находятся в 50 и 20 км на юго-востоке и западе от Москвы соответственно. На всех обследованных участках разрешено движение легкового, грузового и пассажирского транспорта.

Рельеф участков равнинный, растительность рудеральная.

Обобщённые результаты исследования общего содержания фтора в пробах почв на участках, прилегающих к крупным автомобильным дорогам на территории Московской области, представлены в таблице 1.

Концентрации фтора на всех исследованных участках превышают фоновое значение (320 мг/кг), в среднем превышение составляет 3,4 раза. Максимальное превышение фоновой концентрации фтора в почвах отмечено на участке (3) и составляет 6,3 раза. Минимальное превышение (1,2 раза) наблюдается на участке (11). Полученные данные в целом подтверждают сделанные ранее выводы [13] о высокой концентрации фтора в почвах придорожных территорий Московской области, в ряде случаев концентрации превышают 2000 мг/кг. В 70% случаев степень загрязне-

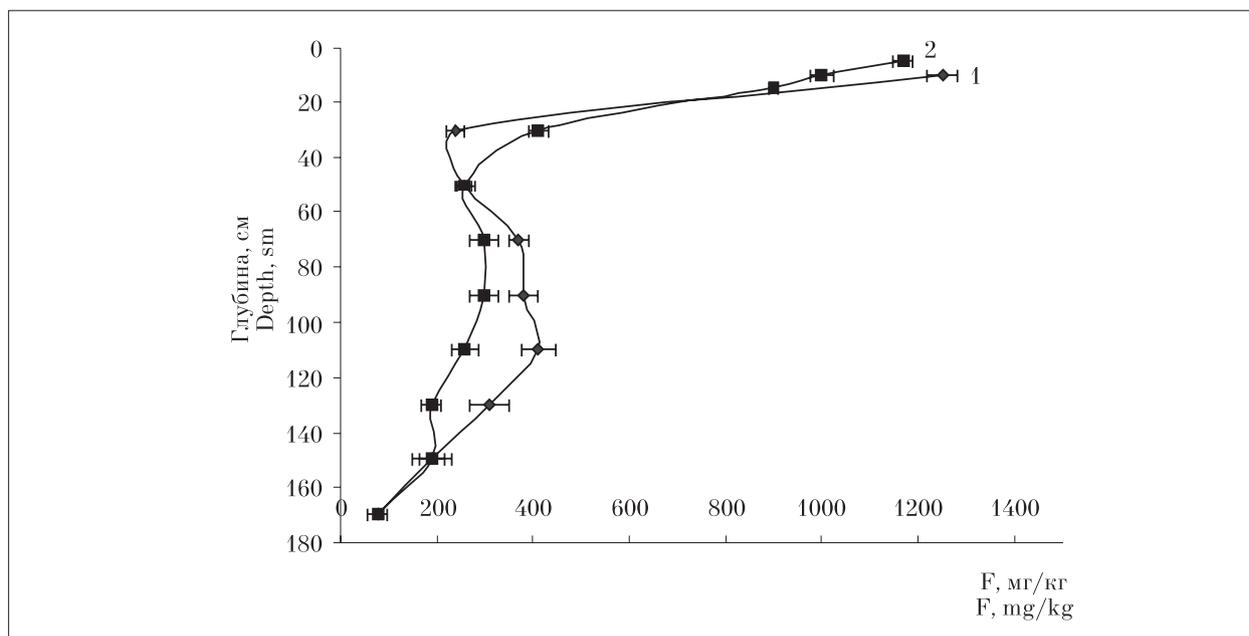


Рис. 2. Распределение содержания фтора в профиле почвы, отобранной на участке, прилегающем к Ярославскому шоссе (1) и трассе М4 Дон (2)
Fig. 2. Distribution of fluorine content in the soil profile at the site adjacent to the Yaroslavl Highway (1) and the M4 Don Highway (2)

Таблица 2 / Table 2

Содержание фтора в почвах на участке (1), прилегающем к Ярославскому шоссе в 2012–2016 гг.
 The content of fluorine in the soils on the site (1), adjacent to the Yaroslavl Highway in 2012–2016 (n = 3; P > 0,95)

Проба / Sample	Содержание фтора, мг/кг Fluorine content, mg/kg		
	05.2012	05.2014	05.2016
1	930±50	1110±100	160±20
2	1340±100	1410±75	210±20
3	930±50	1640±100	200±25
4	760±50	1080±80	240±30
5	1180±75	1560±100	330±30
Среднее значение / Average	1028	1360	228
Фоновое значение / Background value [1]	320		

ния исследованных проб почв Московской области фтором в соответствии с [15] характеризуется, как недопустимая (> 800 мг/кг).

Загрязнение фтором исследованных участков, за исключением участка, прилегающего к автотрассе М4 Дон, является достаточно равномерным. Содержание фтора в обследованных точках в подавляющем большинстве случаев отличается от среднего содержания по участку не более, чем на 25%.

На участке, прилегающем к автотрассе М4 Дон, отклонения содержаний фтора в точечных пробах от среднего значения по участку достигают 90%. В ряде отобранных проб содержание фтора существенно ниже фоновых: 130–160 мг/кг. Вместе с тем, несколько образцов, отобранных на данном

участке, характеризуется высокими значениями (670–1300 мг/кг). Неравномерность загрязнения придорожных почв фтором на данном участке связана с их высокой перемешанностью, возникшей в результате выполнения дорожных и строительных работ на придорожных территориях.

Для более детального обсуждения изучено распределение фтора по глубине на примере кернов почвы, отобранных на участках 1 и 5, прилегающих к Ярославскому шоссе и трассе Дон (рис. 2).

Профиль распределения фтора по глубине имеет общий характер. Максимальные концентрации фтора, превышающие фоновые значения в 3–4 раза, обнаружены в верхнем слое почв на глубинах до 10–15 см, они суще-

ственно снижаются, достигая фоновых на глубинах 25–30 см и даже более низких величин на нижних горизонтах.

Изучение изменения концентраций фтора во времени осуществлялось на участке 1, заложенном близ Ярославского шоссе в период 2012–2016 гг. В 2012–2014 гг. на этом участке были выявлены высокие концентрации элемента, а затем, в 2016 г., произошло резкое снижение, что связано с проведенными масштабными строительными работами в 2015 г. (механическое перемешивание почв) (табл. 2).

Эти данные дополнительно подтверждают антропогенный характер накопления фтора и его техногенную аккумуляцию в верхнем слое придорожных почв Московской области.

Следует отметить отсутствие зависимости между географическим положением участка и содержанием фтора в почвах на различных направлениях Московской области. Полученные данные относятся к участкам

1–12, сравнительно приближенным к Московской кольцевой автодороге и Москве, то есть в основном ближнее Подмосковье, где интенсивность автомобильного движения максимальна. Интересным казалось изучить ситуацию с накоплением фтора на удаленной территории Московской области. Для этого отбор и анализ проб производили на площадке 70 км на северо-восток от г. Москвы, вблизи Ярославского шоссе (Сергиево-Посадский район, 56,37309 °с. ш. 38,30837 °в. д.). В этом случае также наблюдалось повышенное содержание фтора, однако его концентрации существенно более низки, в сравнении с ближними районами Подмосковья (табл. 3).

Целесообразным представлялась оценка изменения концентраций фтора на различной удаленности от крупной автомобильной дороги Московской области. Такая оценка вызывает затруднение в связи с наложенным влиянием достаточно развитой дорожной структуры,

Таблица 3 / Table 3

Содержание фтора в почвах на удаленном от Москвы участке, прилегающем к Ярославскому шоссе (Сергиево-Посадский район) / The content of fluorine in soils on a site remote from Moscow adjacent to the Yaroslavl Highway (Sergiev Posad district) (n = 3; P > 0,95)

Проба Sample	Содержание фтора, мг/кг Fluorine content, mg/kg
1	420±20
2	530±30
3	520±30
4	620±20
5	360±20

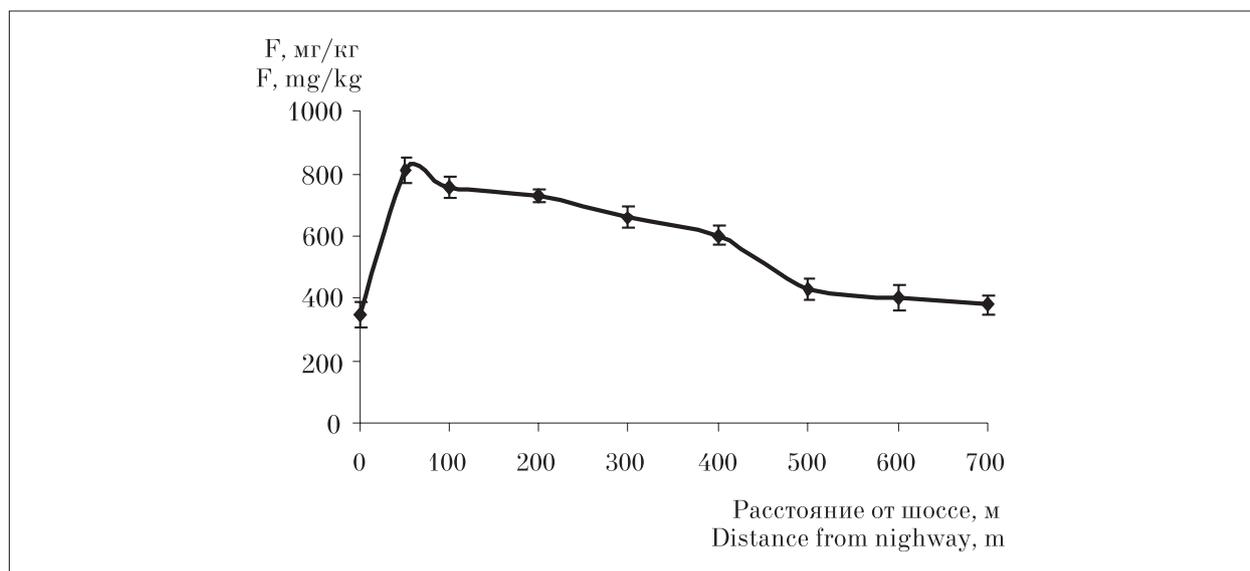


Рис. 3. Зависимость содержания фтора в почвах от расстояния до Фряновского шоссе (перпендикулярное направление)
Fig. 3. Dependence of the fluorine content in soils on the distance from the Fryanovskoye Highway (perpendicular direction)

частым расположением жилых массивов, объектов энергетики. Наиболее удачный вариант такой оценки удалось осуществить при удалении от Фряновского шоссе (рис. 3).

Изменение концентраций происходит монотонно в сторону уменьшения и достигает ≈ 400 мг/кг на расстоянии 700 м, приведенная зависимость подтверждает причинно-следственную связь выбросов автомобильного транспорта с загрязнением придорожных территорий Московской области.

Наиболее вероятным источником фторидного загрязнения исследованных территорий являются выхлопные газы автотранспорта. Известно, что содержание фтора в лёгких нефтепродуктах составляет в среднем $0,1-3$ мг/дм³, а в отдельных случаях могут достигать довольно больших значений, порядка 330 мг/дм³ [16]. Кроме того, ряд технологий получения топлив базируется на применении в качестве катализаторов фтороводорода, который может частично включаться в структуры углеводородов [17]. Одним из мощных источников фторидного загрязнения является и разложение фреонов, содержащихся в системах кондиционирования автомобильной техники. В качестве хладагентов в автомобильных системах кондиционирования воздуха используются фреоны 12 (CCl₂F₂), 22 (CHClF₂) и 134a (CF₃CH₂F) [18, 19]. Количественная оценка выбросов фреонов автомобильным транспортом, выполненная в автомобильном туннеле в районе г. Цюриха (Швейцария), показала, что они могут быть достаточно значимы: средние выбросы в расчёте на одно транспортное средство составили $1,0 \pm 0,2$; $0,6 \pm 0,4$ и $6,2 \pm 0,2$ мг/ч для фреонов 12, 22 и 134a соответственно [18]. Фреоны подвержены фотодegradации в атмосферных условиях с образованием фтороводорода, хлороводорода и углекислого газа [20]. Фотохимическая degradation фреонов фиксировалась также и в Баварии, где в дождевой воде и туманах выявлены фторированные уксусные кислоты и их производные [21].

Заключение

В результате проведённого эколого-аналитического исследования установлено, что общее содержание фтора в почвах придорожных территорий Московской области существенно, до 6,3 раз, превышает фоновое значение для почв мира (320 мг/кг [4]), что позволяет говорить об их загрязнённости. Концентрации фтора существенно уменьша-

ются на удалении от автомобильных дорог и на удалённых территориях от Москвы. Аккумуляция фтора происходит в верхнем слое почв, противоположно аккумуляции, характерной для естественных условий. Отсутствие высоких концентраций фтора наблюдается для свежеперемешанных почв перепланированных в последнее время придорожных территорий. Наиболее вероятной причиной аккумуляции фтора в почвах придорожных территорий является загрязнённость воздушной среды.

Литература

1. Kabata-Pendias A., Pendias H. Biogeochemistry of Trace Elements, 2nd ed. Warsaw: Wyd. Nauk PWN, 1999. 400 p.
2. Jha S.K., Nayak A.K., Sharma Y.K., Mishra V.K., Sharma D.K. Fluoride accumulation in soil and vegetation in the vicinity of Brick Fields // *Bul. Environ. Contamin. Toxicol.* 2008. V. 80. P. 369–373.
3. Selinus O., Alloway B.J. Essentials of medical geology: impacts of the natural environment on public health. Academic Press, 2005. 824 p.
4. Cape J.N., Fowler D., Davison A. Ecological effects of sulfur dioxide, fluorides, and minor air pollutants: recent trends and research needs // *Environment International.* 2003. V. 29. No. 2–3. P. 201–211.
5. O'Hagan D., Harper D.B. Fluorine containing natural products // *Journal of Fluorine Chemistry.* 1999. V. 100. P. 127–133.
6. Dhar V., Bhatnagar M. Physiology and toxicity of fluoride // *Indian J. Dent. Res.* 2009. V. 20. P. 350–355.
7. Фтор и фториды. Совместное издание Программы ООН по окружающей среде, организации труда и Всемирной организации здравоохранения. Женева, 1989. 114 с.
8. ГОСТ 17.4.4.02-84. Охрана природы. Почвы. Методы отбора и подготовки проб для химического, бактериологического, гельминтологического анализа. М.: Стандартинформ. 2008. 7 с.
9. Бебешко Г.И., Хализова В.А. Ионметрическое определение фторид-иона в минеральном сырье и горных породах: инструкция Научного совета по аналитическим методам (НСАМ) № 189–X. М.: ВИМС, 1981. 22 с.
10. Стандартные образцы химического состава природных минеральных веществ: метод. рекомендации / Составитель Н.В. Арнаут. Новосибирск: ИГИГ СО АН СССР, 1987. 204 с.
11. Tavener S.J., Clark J.H. Fluorine: friend or foe? A green chemist's perspective // *Advances in fluorine science.* V. 2. Elsevier. 2006. P. 177–202.
12. Васильев Н.В., Петренко Д.Б. Делокализация фтора в связи с реализацией Монреальского протокола по озонобезопасным фреонам // *Вестник МГОУ.* 2013. № 5. С. 54–58.

13. Петренко Д.Б., Нестеров И.С., Якунина Ю.Н., Новикова Н.Г., Корсакова Н.В., Васильев Н.В. Фтор в почвах придорожных территорий Московской области // Вестник МГОУ. 2013. № 5. С. 75–79.

14. 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.

15. Танделов Ю.П. Фтор в системе почва – растение. Красноярск: Красноярская городская типография, 2012. 146 с.

16. Wilson J. N., Marczewski C. Determination of fluorine in petroleum and petroleum process catalysts with a fluoride electrode // Analytical Chemistry. 1973. V. 45. P. 2409–2412.

17. Weinstein L.H., Davison A.W. Fluorides in the Environment. CABI Publishing, UK. 2004. 287 p.

18. Stemmler K, O'Doherty S., Buchmann B., Reimann S. Emissions of the Refrigerants HFC-134a, HCFC-22, and CFC-12 from Road Traffic: Results from a Tunnel Study (Gubrist Tunnel, Switzerland) // Environ. Sci. Technol. 2004. V. 38. No. 7. P. 1998–2004.

19. Zhang Y., Yang W., Huang Z. Leakage rates of refrigerants CFC-12, HCFC-22, and HFC-134a from operating mobile air conditioning systems in Guangzhou, China: Tests inside a busy urban tunnel under hot and humid weather conditions // Environ. Sci. Technol. Lett. 2017. V. 4. No. 11. P. 481–486.

20. Tennakone K., Wijayantha K.G.U. Photocatalysis of CFC degradation by titanium dioxide // Applied Catalysis B: Environmental. 2005. V. 57. P. 9–12.

21. Rompp A., Klemm O., Fricke W., Frank H. Haloacetates in Fog and Rain // Environ. Sci. Technol. 2001. V. 35. No. 2. P. 1294–1298.

References

1. Kabata-Pendias A., Pendias H. Biogeochemistry of Trace Elements, 2nd ed. Warsaw: Wyd. Nauk PWN, 1999. 400 p.

2. Jha S.K., Nayak A.K., Sharma Y.K., Mishra V.K., Sharma D.K. Fluoride accumulation in soil and vegetation in the vicinity of Brick Fields // Bul. Environ. Contamin. Toxicol. 2008. V. 80. P. 369–373.

3. Selinus O., Alloway B.J. Essentials of medical geology: impacts of the natural environment on public health. Academic Press, 2005. 824 p.

4. Cape J.N., Fowler D., Davison A. Ecological effects of sulfur dioxide, fluorides, and minor air pollutants: recent trends and research needs // Environment International. 2003. V. 29. No. 2–3. P. 201–211.

5. O'Hagan D., Harper D.B. Fluorine containing natural products // Journal of Fluorine Chemistry. 1999. V. 100. P. 127–133.

6. Dhar V., Bhatnagar M. Physiology and toxicity of fluoride // Indian J. Dent. Res. 2009. V. 20. P. 350–355.

7. Fluorine and Fluorides. World Health Organization. Environmental Health Criteria: Geneva, 1984. 114 p. (in Russian).

8. GOST 17.4.4.02-84. Protection of Nature. Soil. Methods of selection and preparation of samples for chemical, bacteriological, helminthological analysis. Moskva: Standartinform. 2008. 7 p. (in Russian).

9. Reference materials of the chemical composition of natural minerals: methodical recommendations compiled by Arnautov N.V. Novosibirsk: IGIG SB AS USSR, 1987. 204 p. (in Russian).

10. Bebekko G.I., Khalizova V.A. Ionometric determination of the fluoride ion in mineral raw materials and rocks: Instruction of the scientific council for methods analysis (NSAM). No. 189 – X. Moskva: VIMS, 1981. 22 p. (in Russian).

11. Tavener S.J. Clark J.H. Fluorine: friend or foe? A green chemist's perspective // Advances in fluorine science. V. 2. Elsevier. 2006. P. 177–202.

12. Vasiliev N.V., Petrenko D.B. Delocalization of fluorine in connection with the implementation of the Montreal Protocol on ozone-friendly freons // Vestnik MSRU. 2013. No. 5. P. 54–58 (in Russian).

13. Petrenko D.B., Nesterov I.S., Yakunina Yu.N., Novikova N.G., Korsakova N.V., Vasilyev N.V. Fluoride in the soils of roadside territories of the Moscow Region // Vestnik MГОU. 2013. No. 5. P. 75–79 (in Russian).

14. Petrenko D.B., Gladнева О.А., Voronchikhina K.A., Vasiliev N.V. Content of fluoride ions in surface waters of urbanized territories of the Moscow Region // Teoreticheskaya i prikladnaya ekologiya. 2017. No. 3. P. 65–72 (in Russian).

15. Tandelov Yu.P. Fluoride in soil – plant system is a plant. Krasnoyarsk, 2012. 146 p. (in Russian).

16. Wilson J. N., Marczewski C. Determination of fluorine in petroleum and petroleum process catalysts with a fluoride electrode // Analytical Chemistry. 1973. V. 45. P. 2409–2412.

17. Weinstein L.H., Davison A.W. Fluorides in the Environment. CABI Publishing, UK. 2004. 287 p.

18. Stemmler K, O'Doherty S., Buchmann B., Reimann S. Emissions of the Refrigerants HFC-134a, HCFC-22, and CFC-12 from Road Traffic: Results from a Tunnel Study (Gubrist Tunnel, Switzerland) // Environ. Sci. Technol. 2004. V. 38. No. 7. P. 1998–2004.

19. Zhang Y., Yang W., Huang Z. Leakage rates of refrigerants CFC-12, HCFC-22, and HFC-134a from operating mobile air conditioning systems in Guangzhou, China: Tests inside a busy urban tunnel under hot and humid weather conditions // Environ. Sci. Technol. Lett. 2017. V. 4. No. 11. P. 481–486.

20. Tennakone K., Wijayantha K.G.U. Photocatalysis of CFC degradation by titanium dioxide // Applied Catalysis B: Environmental. 2005. V. 57. P. 9–12.

21. Rompp A., Klemm O., Fricke W., Frank H. Haloacetates in Fog and Rain // Environ. Sci. Technol. 2001. V. 35. No. 2. P. 1294–1298.

**О развитии *Azotobacter chroococcum* Beiyrinck
в старовозрастных отвалах антрацита**

© 2018. В. С. Артамонова¹, д. б. н., в. н. с.,

С. Б. Бортникова², д. б. н., зав. лабораторией,

¹Институт почвоведения и агрохимии СО РАН,

630090, Россия, г. Новосибирск, пр. Академика Лаврентьева, 8/2,

²Институт нефтегазовой геологии им. А.А. Трофимука СО РАН,

630090, Россия, г. Новосибирск, пр. Академика Коптюга, 3,

e-mail: artamonova@issa.nsc.ru, bortnikovasb@ipgg.sbras.ru

Увеличение объёмов добычи каменного угля ведёт к образованию отвалов вскрышных пород, которые негативно воздействуют на окружающую среду. Безопасность отвалов зависит от присутствия углистых частиц, аккумулирующих радиоактивные и токсичные элементы, которые влияют на жизнепригодность первопоселенцев. На примере бактерии *Azotobacter chroococcum*, которая участвует в формировании почвенных свойств, показано, что в мелкозёме отвалов антрацитового месторождения в Западной Сибири в посттехногенный период формируются разные условия для жизнедеятельности бактерии. Установлено, что выветренный антрацит, почвообразующая порода – потенциально-плодородный карбонатный суглинок и почвоподобные тела – эмбриозёмы, или молодые почвы, заселены бактерией одинаково максимально, но по скорости и характеру роста азотобактера они различаются. Наилучшие условия для развития азотобактера складываются в почвообразующей породе, благодаря высокому содержанию жизненно важных элементов, прежде всего Са и Мо. В эмбриозёмах набор питательных элементов был представительнее, в него входили Са, Мп, К, Fe, Мо, но одновременно присутствовали As, подвижные формы Zn, Pb, Co, Cd, Cu. В первом случае проявлялся мицелиевидный характер роста, обеспечивший максимальное освоение экониш бактерией. Во втором случае проявился защитный эффект бактерии от токсикантов – рост был ризоидный с продуцированием слизи и выраженным синтезом каротиноидных пигментов. В выветренном антраците присутствие токсикантов и дефицит пищи обусловили схожий адаптивный ответ – скорость роста была минимальной, колонии характеризовались плотной слизью и синтезом экзопигментов. Высказывается предположение, что радиоактивные элементы, такие как U и Th, присутствующие в углистых частицах эмбриозёмов и антрацита, способствуют выживанию азотобактера в техногенной обстановке. Полученные результаты расширяют знания об экологии азотобактера, представляют интерес для создания биопрепаратов – почвоулучшителей поверхности техногенных отходов в регионах добычи метаморфизированных углей.

Ключевые слова: азотобактер, антрацит, лессовидный карбонатный суглинок, молодая почва, токсичные и радиоактивные элементы.

**About the development of *Azotobacter chroococcum* Beiyrinck
in old-age dumps of anthracite**

V. S. Artamonova¹, S. B. Bortnikova²,

¹Institute of Soil Science and Agrochemistry, SB RAS,

8/2, Lavrentjev Pr., Novosibirsk, Russia, 630090,

²Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics, SB RAS,

3, Academician Koptug Pr., Novosibirsk, Russia, 630090,

e-mail: artamonova@issa.nsc.ru, bortnikovasb@ipgg.sbras.ru

The increase in the volume of coal mining leads to the formation of waste dumps that negatively affect the ecology of the environment. The safety of the waste dumps depends on the presence of coal particles, which accumulate radioactive and toxic elements, and affect the viability of the first settlers. On the example of the bacterium *Azotobacter chroococcum*, which participates in the formation of soil properties, it is shown that in the fine fraction of the anthracite waste dumps in Western Siberia, different conditions for the life of the bacteria are formed in the post-technogenic period. It has been established that the weathered anthracite, soil-forming rock – potentially fertile carbonate loam and soil-like bodies – embryozems, or young soils, are equally maximally populated by the bacterium, but they differ in the speed and nature of *Azotobacter* growth. The best conditions for the development of bacteria in the soil-forming rocks are formed due to the high content of vital elements, especially Ca and Mo. In embryos the set of nutrients was more representative, it included

Ca, Mn, K, Fe, and Mo, but there were As, and mobile forms of Zn, Pb, Co, Cd, Cu simultaneously. In the first case, the mycelial growth pattern was manifested, which ensured the maximum growth rate of the bacterium. In the second case, the protective effect of the bacterium against toxicants was exhibited – the growth was rhizoid with the production of mucus and the pronounced synthesis of coratinoid pigments. In the weathered anthracite, the presence of toxicants and a food deficit caused a similar adaptive response – the growth rate was minimal and was achieved by the compact growth of a colony with dense mucus and the synthesis of exopigments. It is suggested that the radioactive elements, such as U and Th, present in embryos and anthracite, contribute to the survival of *Azotobacter* in anthropogenic environment. The obtained results broaden knowledge of the azotobacter's ecology, and are of interest for the creation of biologicals – soil improvers on the surface of technogenic wastes in the regions of coal mining.

Keywords: azotobacter, anthracite, loess-like calcareous loam, young soil, toxic and radioactive elements.

Открытая (карьерная) добыча ископаемых углей порождает серьезные экологические проблемы. На дневной поверхности происходит накопление отвалов вскрышных пород с углистыми остатками, которые содержат широкий набор химических элементов, в том числе потенциально токсичных и опасных радиоактивных [1–3]. Особенно обогащены вредными примесями угли наиболее высокой степени углефикации (метаморфизма) – антрациты. Присутствие химических элементов в них обусловлено магматической, вулканической и тектонической активностью земной коры в древние геологические эпохи (210–280 млн. лет назад), которая сопровождала угле-образование.

В России лидерство по добыче метаморфита с 2015 г. принадлежит Сибирскому федеральному округу (его доля составляет около 60%). Залежи высококачественного антрацита – Ultra High Grade (UHG) сосредоточены в Горловском антрацитовом бассейне в пределах Искитимской геотехнической системы (Новосибирская область), в 100 км от мегаполиса г. Новосибирск. Но угли этого месторождения геохимически специализированы на As, Au, Br, Co, Sr и их содержание в угольных пластах промышленно значимо. Наряду с этими элементами присутствуют тяжёлые и природные радиоактивные металлы. Широкий набор химических элементов в углях, оказавшихся на дневной поверхности, небезопасен для окружающей среды. В целях предотвращения угрозы возникновения массовых неинфекционных заболеваний (отравлений), вызванных химическим загрязнением, для имущественного комплекса горнотранспортной части угольного разреза «Горловский» Постановлением РФ от 28 августа 2017 г. [4] установлена санитарно-защитная зона во всех направлениях от границы земельного участка (на расстоянии 300 м), возложен контроль федеральных органов за соблюдением её размера. Априори химическому загрязнению подвержены почвообразующие породы, поч-

вopodobные образования, подотвальные воды, воздух, растительность, зрелые почвы, в том числе за пределами карьерных полей. Это актуализирует решение проблемы экологической безопасности угледобывающего района, поиск технологий ускоренного формирования продуктивных биоценозов, как прежних, так и искусственных, с трендом на восстановление почвенного плодородия, гумусового горизонта, качества почв. В связи с этим представляется своевременным изучение развития аэробной свободноживущей бактерии *Azotobacter chroococcum* в старовозрастных отвалах антрацита, поскольку бактерия выполняет важные экосистемные функции: продукционные, средообразующие, санитарные, однако в обстановке геохимического наследия она изучена недостаточно.

Азотобактер обогащает жизнеобитаемые среды азотсодержащими соединениями и биологически активными веществами (никотиновой и пантотеновой кислотой, пиродоксином, биотином, гетероауксином, гиббереллином и др.), стимулирующими прорастание и развитие растений [5–14]. Некоторые штаммы азотобактера, продуцирующие индолил-3-уксусную кислоту, повышают термоустойчивость проростков [15], что чрезвычайно важно для фитопоселенцев на отвалах. В присутствии специфичных штаммов азотобактера в ризосфере растений возрастает содержание аминокислот, особенно незаменимых [16]. Некоторые штаммы бактерии проявляют положительный хемотаксис к веществам, входящим в мучигель вокруг корней небобовых растений, способность проникать в зону гистосферы, размножаться там [17], обуславливая морфофизиологические изменения клеток партнёра. Не исключено, что азотобактер, продуцирующий меланин – продукт реакции окислительной конденсации природных полифенолов, оказывается вовлечённым в формирование бобово-ризобиального симбиоза. Фенольные соединения в низких концентрациях усиливают образование клубеньков у клевера лугового до

240% [18]. Некоторые экзогенные метаболиты фенольной природы существенно повышают активность нитрогеназы в клубеньках [19]. В свою очередь, продукт азотобактера триптофан – предшественник индолилуксусной кислоты (гормона из группы ауксинов), возможно, тоже участвует в активизации нодуляции (согласно так называемой ауксиновой гипотезе), подобно продуктам экзоосмоса самой корневой системы [18]. Присутствие триптофана (на разлагающейся ткани) зарегистрировано в молодых почвах углеотвалов, а в чернозёме выщелоченном, тёмно-серой лесной и горно-таёжной псевдоподзолистой почвах аминокислота отсутствовала [20]. Известно, что между бактериями *Azotobacter* и *Rhizobium* отмечаются генетические трансформации, которые, возможно, реализуются в техногенных условиях их совместного обитания. Гены белковых субъединиц компонентов нитрогеназы некоторых представителей родов *Rhizobium* и *Azotobacter* образуют единый оперон [21], часть *nif*-генов обладает характерными чертами транспозона. В этой связи нельзя не допустить возможность обмена генами диязотрофных бактерий в случае, когда *Rhizobium* находится в свободноживущем состоянии, в том числе после освобождения нодулирующих штаммов из травмированных бактериоидов, окружённых *Azotobacter chroococcum*. Не следует исключать его и на этапе адсорбции ризобий на корневых волосках в присутствии азотобактера. Как известно, бактерии родов *Rhizobium* и *Bradrhizobium* «узнают» своего хозяина по гликопротеину – лектину, расположенному на корневых волосках. Какова же роль гликопротеинового комплекса азотобактера на стадии преинфекции до конца не ясна, как и нет ответов на многие другие вопросы. Об участии бактерии в образовании бобово-ризобияльного симбиоза судят по молекулярно-генетическим и эколого-биохимическим особенностям взаимоотношений, но, к сожалению, комплексные исследования ассоциативной и симбиотической азотфиксации, активно осуществляемые в институтах Сибирского отделения РАН (ИПА, ЦСБС, ИЦиГ) в прошлом веке, из-за ограничения финансирования в начале нового столетия, фактически остановились. Поэтому многие аспекты взаимодействия бактерий и дикорастущих растений на начальных стадиях развития симбиоза в почвах Сибири остаются до конца не изученными. Место азотобактера в ризосфере гораздо значимее, чем мы представляем, но пока неизвестно каким образом

регулируется поведение популяции в ней. Молекулярно-генетический анализ взаимодействия бактерий, в том числе азотобактера, стимулирующих рост и развитие растений, осуществляется с помощью разных стратегий. В изучении механизмов ассоциативности используются генотипические и фенотипические методы [22].

Полифункциональные особенности азотобактера особенно привлекательны в генно-инженерном конструировании ризосферы. Формирование геномных клонов не менее значимо в решении ряда практических задач, в том числе появлении у растений партнёров так называемой индуцированной устойчивости, повышающей защиту от стрессов, фитопатогенов, тяжёлых металлов, так важной на техногенных объектах.

Средообразующая функция азотобактера в значительной степени обеспечивается продуцированием экзополисахаридов, которые связывают металлы с образованием хелатов [23], что позволяет рассматривать эти бактериальные вещества в качестве детоксикантов. Кроме того, как и другие микроорганизмы, азотобактер синтезирует соединение фенольной природы – меланин [24], особенно при высоких уровнях дыхания [25], возможно, участвует в пополнении гуминоподобных веществ, чрезвычайно важных на начальных этапах становления почв.

Доказано, что бактерия метаболически активна в экстремальных условиях северного и южного полярного региона, несмотря на короткие местные сезоны роста и относительно низкие значения рН, в арктическом регионе: в глине и суглинках (в том числе торфянистых и песчаных суглинках), в антарктическом регионе – в грунте побережья [26]. В сухих почвах азотобактер сохраняет жизнеспособность в виде цист [27]. Поэтому его жизнедеятельность в техногенных экосистемах, как и других уязвимых условиях обитания, заслуживает пристального внимания и многостороннего рассмотрения.

Санитарная функция азотобактера обусловлена антифунгальным действием продуцируемых им фунгицидных веществ из группы анисомидина, которые угнетают развитие некоторых микромицетов в ризосфере растений [28, 29]. Интересно также, что противовирусный эффект может обуславливаться меланином [30]. Не случайно, эта антагонистическая способность азотобактера в сочетании с синтезом экзополисахаридов недавно нашла применение в производстве

наночастиц против фитопатогенов [31]. Кроме этого, использование азотобактера в комплексе с вермикомпостами рассматривается как экологически чистый путь снижения химических удобрений [32]. Ведутся эксперименты с целью использования способности бактерии аккумулировать полистеролы в дизайне кластера генов других бактерий [33], что может оказаться интересным в практическом отношении. Стоит сказать, что в большинстве биотехнологических процессов используется ограниченное разнообразие микроорганизмов, которые классифицируются как GRAS (“generally recognized as safe”) и обычно считаются безопасными. Поэтому азотобактер может оказаться базовым объектом биотехнологии улучшения качества техногенной среды обитания, в том числе в техногенном элювии вскрышных и вмещающих пород угольных месторождений, в том числе антрацита. Однако информации о химизме таких местообитаний и особенностях их заселения бактерией практически нет, поскольку сведения о геохимии углей долгое время были недоступны для открытой печати. Судя по единичным работам, бактерия осваивает уже однолетние углеотвалы Кузбасса [14], обнаруживая при этом 30%-ную встречаемость. В условиях дефицита углерода бактерия могла утилизировать углеродистые соединения собственных экзополисахаридов и фитопоселенцев. По отношению к источникам углерода В.Л. Омелянский в 1923 г. (в книге «Невидимый мир») назвал азотобактер полифагом – «всеядным организмом» [34], потому что бактерия, наряду с углеводами, усваивает малодоступные другим микробам органические кислоты жирного и ароматического ряда, летучие органические соединения, в том числе одно- и многоатомные спирты. Следует сказать, что виды рода *Azotobacter* характеризуются редко встречающейся в природе способностью усваивать углерод из ароматических соединений. Более того, после разрушения растительного скелета (целлюлозы, гемицеллюлозы, лигнина) в среде обитания азотобактера преобладают продукты брожения: жирные кислоты, спирты – «отходы брожения», бедные связанным азотом [35]. При этом бактерия утилизирует «плохие» питательные вещества, фиксирует азот атмосферы, размножается. Возбудители брожения такую конкуренцию за дефицитный азот не выдерживают. Склонность азотобактера к указанным веществам сопровождается сохранностью их морфологических свойств.

Выживанию азотобактера на старовозрастных углеотвалах может способствовать выветренность (окисленность) карбоидов углей с высвобождением гуминовых кислот (ГК). ГК карбоидного генезиса присутствуют в каустобиолитах: торфе, буром и каменном угле, в том числе геологически окисленных вариантах и экспериментально выветренных. Фрагментарный состав ГК бурых углей представлен карбоксильным, ароматическим, полисахаридным, алифатическим углеродом, а элементный состав ГК сложен С, Н, N, O [36]. Утилизация ГК азотобактером, а также бациллами, миксобактериями, плесневыми грибами, актиномицетами выявлена в лабораторных условиях ещё в середине прошлого века. Углерод и азот ГК бурых углей усваивается микробами, что доказано с помощью газовой хроматографии [37]. Возможно, углерод ГК окисленных метаморфитов, как и других углей, доступен азотобактеру в качестве источника питания и энергии, так же, как и углефицированной древесины, фитолитов, микрофосиллий микроорганизмов и водорослей.

Цель настоящей работы заключалась в изучении развития *Azotobacter chroococcum* в старовозрастных отвалах антрацита (на примере Горловского месторождения). Задачи исследований включали определение заселённости мелкозёма бактерией (по проценту обрастания комочков), скорости и характера её роста в выветренном антраците, почвообразующей породе, молодой почве с учётом особенностей их химической характеристики.

Объекты и методы исследований

Объекты исследований расположены на участке промышленной добычи антрацита, в лесостепной зоне, на стыке Салаирского низкогорья (его западного склона) и Присалаирской дренированной равнины (Западная Сибирь). Покровные породы угленосных залежей – лессовидные карбонатные суглинки. Характерная суглинкам микроагрегированность, пористость, щелочная реакция среды, насыщенность основаниями обуславливает их значительную ценность в качестве почвообразующих пород. На поверхности суглинка в старовозрастных отвалах антрацита выявлено формирование почвоподобных образований, или новых почв – эмбриозёмов.

В этой связи нами были обследованы лёссовидный карбонатный суглинок, эмбриозёмы и выветренный (окисленный) антрацит. Бак-

териальному и химическому анализу подвергнут мелкозём поверхности данных объектов. Определение заселённости и скорость роста бактерии проводили методами, изложенными ранее [38]. Выявление содержания геохимических элементов в мелкозёме проводили методом РФА-СИ для твёрдых проб на станции ВЭПП-3 Института ядерной физики СО РАН (аналитик Ю.П. Колмогоров). Чувствительность определения элементов на базе СИ – 0,1 г/т. Содержание подвижных форм тяжёлых металлов (ТМ) определяли в лаборатории биогеохимии почв ИПА СО РАН согласно методу, представленному в предыдущей работе [38].

Полученные результаты обрабатывались с применением компьютерных программ математической статистики (Statistica 6.0). Повторность определения заселённости и скорости роста азотобактера $n = 150$ (по 50 комочков в каждой из 3 чашек Петри), повторность определения химических элементов 3-кратная. В таблицах и на рисунке приведены средние арифметические данные, стандартные ошибки которых не превышают 10%.

Результаты и обсуждение

Исследования показали, что поверхность самозарастающих 30-летних отвалов антрацита колонизирована азотобактером повсеместно. Мелкозём почвообразующих пород, почвоподобных образований и выветренного антрацита обнаруживает 100%-ное заселение бактерией. Этому, вероятно, благоприятствует сорбция бактериальных клеток разбухающими минералами группы монтмориллонита, которые наиболее распространены среди глинистых минералов вскрыши.

По нашим данным в почвообразующей породе и почвоподобном образовании азотобактер размножался быстрее, чем в выветренном антраците. Ореол роста бактерии вокруг мелкозёма выветренного угля достигал максимума через трое суток, в остальных случаях – через двое. Скорость роста, рассчитанная за сутки, оказалась максимальной в лёссовидном карбонатном суглинке, минимальная – в выветренном угле (рис. 1).

Статистическая обработка показателей роста бактерии вокруг комочков мелкозёма показала, что данные достоверны (табл. 1). Площадь ореола роста азотобактера вокруг мелкозёма выветренного угля (пластинки, крошка, смесь) составила 46,0–75,5 мм², вокруг мелкозёма лёссовидного карбонатного суглинка – 72,6 мм², в то время как вокруг

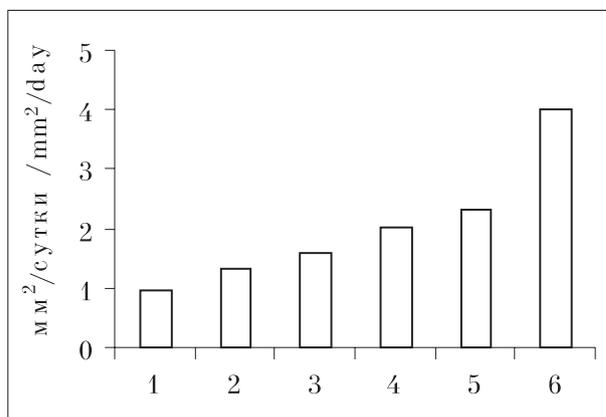


Рис. 1. Рост азотобактера вокруг 1 мм² мелкозёма разных экоотопов отвала: 1 – уголь, пластинки; 2 – уголь, пластинки + крошка; 3 – уголь, крошка; 4 – эмбриозём под щавелем; 5 – эмбриозём под разнотравьем; 6 – суглинок

Fig. 1. Growth of *Azotobacter* around 1 mm² of fine-grained soil in different ecotopes of the dump: 1 – coal, plates; 2 – coal, plates + crumb; 3 – coal, crumb; 4 – embryozems under sorrel; 5 – embryozem under motley grass; 6 – loam

такового эмбриозёмов (под высшими растениями) достигла 95,0 мм². Общая площадь ореола роста бактерии с площадью комочка мелкозёма в варианте с углем составила 77,2–106,8, в суглинке – 114,0, в эмбриозёмах – 108,3–140,1 мм². Учитывая, что площадь самих комочков мелкозёма возрастала от антрацита (31,2–37,8 мм²), к суглинку (41,4 мм²) и затем к эмбриозёмам (43,3–45,1 мм²), вероятно, вследствие разных сил сцепления минеральных частиц, можно предположить, что наиболее бактериально активными были суглинки и эмбриозёмы.

Анализ подвижных форм элементов минерального питания азотобактера на отвале показал, что жизненно важный элемент роста – Са преобладает в почвообразующей породе и эмбриозёмах. Максимум Fe (56 мг/кг) и Mn (50 мг/кг) присутствует в последних (табл. 2). При этом содержание подвижных форм Fe, Zn и Pb также оказалось наибольшим в эмбриозёмах. Возможно, снижению токсичности ТМ способствовало хелатообразование и рН_{водн.} среды (6,4–8,5), не благоприятствующие подвижности катионогенных элементов (которые мигрируют в основном в форме катионов).

Максимальное содержание Мо обнаружено в суглинке, где оно превысило кларк литосферы, в эмбриозёмах – равнялось ему (табл. 3). В щелочной обстановке, которая складывается на отвалах, соединения Мо, как анионогенного элемента, могут проявлять высокую растворимость и усвояемость микроорганизмами. Поглощают Мо как

Таблица 1 / Table 1

Статистические показатели роста азотобактера (за сутки)
Statistical indicators of Azotobacter growth (per day)

№	S	M±σ	v, %	Доверительный интервал Confidence interval		НСР SMD p < 0,05
				-95,0%	+95,0%	
1	O	61,2±5,7	9,3	60,3	62,1	0,92
	M	37,8±4,4	11,7	37,1	38,5	0,71
	K	99,0±9,3	9,4	97,5	100,5	1,50
2	O	75,5±8,2	10,8	74,2	76,9	1,32
	M	31,2±4,5	14,3	30,5	32,0	0,72
	K	106,8±11,2	10,5	105,0	108,6	1,81
3	O	46,0±5,5	11,9	45,1	46,9	0,88
	M	31,2±4,6	14,6	30,5	32,0	0,74
	K	77,2±8,8	11,4	75,8	78,6	1,42
4	O	95,0±16,5	17,3	92,4	97,7	2,65
	M	45,1±8,2	18,2	43,7	46,4	1,32
	K	140,1±23,2	16,5	136,3	143,8	3,74
5	O	64,9±9,1	14,0	63,4	66,4	1,47
	M	43,3±6,7	15,5	42,3	44,4	1,08
	K	108,3±14,4	13,3	105,9	110,6	2,33
6	O	72,6±7,4	10,2	71,4	73,7	1,19
	M	41,4±6,3	15,3	40,4	42,4	1,02
	K	114,0±12,2	10,7	112,0	115,9	1,97

Примечание: № – номер пробы; 1 – пластинки угля; 2 – пластинки + крошка угля; 3 – крошка угля; 4 – эмбриозём под щавелем; 5 – эмбриозём под разнотравьем; 6 – суглинок; S – площадь, мм²; O – площадь ореола роста бактерии вокруг комочка мелкозёма; M – площадь комочка мелкозёма; K – суммарная площадь колонии (O+M); НСР – наименьшая средняя разность.

Note: No. – sample number; 1 – plates of coal; 2 – plates + crumb of coal; 3 – crumb of coal; 4 – embryozem under sorrel; 5 – embryozem under motley grass; 6 – loam; S is the area, mm²; O – area of halo of bacteria growth around a lump of fine earth; M is the area of a lump; K is the total area of the colony (O + M); SMD – the smallest mean difference.

Таблица 2 / Table 2

Содержание подвижных форм металлов в разных экотопах, мг/кг
The content of metal mobile forms in different ecotopes, mg/kg

Элемент Element	Суглинок Loam	Выветренный антрацит Weathered anthracite		Молодая почва Young soil	
		пластинки plates	крошка crumb	щавель sorrel	разнотравье motley grass
K	100±18	136±25	131±26	280±42	200±38
Na	154±35	63±18	24±12	29±14	32±16
Ca	4800±410	1000±150	800±66	2700±460	1970±350
Mg	800±84	500±63	250±37	420±47	460±52
Fe	4±1	4±1	10±3	16±6	56±18
Mn	4±1	5±2	14±3	50±17	46±13
Zn	0,7±0,2	1,2±0,4	2,9±1,1	9,3±2,5	4,8±1,3
Cu	0,3±0,1	0,6±0,2	0,4±0,2	0,2±0,1	0,6±0,2
Cd	0,03±0,01	0,02±0,01	0,08±0,03	0,1±0,08	0,06±0,02
Pb	0,6±0,2	0,7±0,2	2,9±1,0	1,5±0,5	1,7±0,6
Co	<0,2	<0,2	<0,2	0,2±0,05	0,6±0,2
Ni	0,9±0,2	0,5±0,2	0,7 ±0,2	0,6±0,1	0,9±0,3

жизнедеятельные клетки, так и покоящиеся. Растущие клетки усваивают его значительно активнее, чем старые. Молибден входит в состав нитрогеназы, благодаря чему участвует в связывании азота атмосферы азотобактером. Кроме этого, Мо вместе с другими элементами с переменной валентностью (Fe, Co, Cu) служит посредником при переносе электронов в окислительно-восстановительных ферментативных реакциях.

Обращает на себя внимание и высокое повсеместное содержание Cd (в количестве, превышающем кларк литосферы и углей). Cd химически очень близок к Zn, способен защищать его в биохимических реакциях, например, выступать как псевдоактиватор, или, наоборот, как ингибитор Zn – содержащих белков и ферментов. Избыток Cd в среде обитания азотобактера может нарушать метаболизм Fe, Ca, Zn, Mg, Cu. Не исключено, что Cd, поглощённый азотобактером, связывается белками – в таком состоянии он менее токсичен, хотя и не безвреден.

Следует подчеркнуть, что в выветренном антраците и эмбриозёмах присутствует мышьяк, который входит в геохимический спектр углей исследуемого бассейна, обнаруживая контрастные аномалии. Как известно, сульфид

мышьяка в воде не растворим и, следовательно, не ядовит. Но он легко окисляется, образуя токсичные оксиды As(III) и As(V), которые вызывают деструктивные изменения в клетке. Кроме этого, мышьяк образует арсенаты щелочных металлов и аммония, которые растворимы в воде. Арсенаты в той или иной степени токсичны, действуют как инсектициды, фунгициды и бактерициды. Они блокируют сульфгидрильные группы, ответственные за ряд реакций клеточного обмена. На отвалах антрацита, где Ca и Pb присутствуют в избытке, арсенаты этих металлов, очевидно, присутствуют. Арсенат кальция содержит до 42% оксида мышьяка(V), ядовит для всего живого. В природных условиях наблюдается переход арсенатов в арсениты, которые наиболее подвижны в нейтральной и щелочной среде. При метилировании арсенитов образуются метилмышьяковистые кислоты. В аэробных условиях образуется триметилсарцин.

В исследуемых нами образцах максимальное содержание As достигало 15,1 мг/кг, что многократно превышало кларк литосферы. В углях США максимум мышьяка составлял 10 мг/кг, в то время как в углях китайской провинции Чжуджоу – 9000 мг/кг [40]. Вместе с тем, риск для некоторых представителей

Таблица 3/ Table 3

Максимальные значения содержания редких, в том числе токсичных и радиоактивных, элементов в разных экотопах на отвале антрацита, мг/кг (по данным РФА-СИ)
The maximum content of rare, including toxic and radioactive elements in the different ecotops in anthracite dump, mg/kg (according to SR-XRF data)

Элемент Element	Почвообразующая порода Soil-forming rock	Выветренный антрацит Weathered anthracite	Эмбриозём Embryozem	Кларк Clarke	
				литосфера* lithosphere*	угли** coal**
Ge	Н.о./ DI	3,0	2,6	1,4	2,9±0,3
Br	24	1,2	3,5	2,1	Н.д./N.d.
Rb	31	140	99	150	16±4
Sr	260	224	115	340	76±23
Y	17	33	29	29	6,0±1,0
Zr	78	280	250	170	41±4
Nb	7,6	19	13	20	1,8±0,9
Mo	9,4	1,6	1,3	1,1	3,0±0,4
Sn	0,39	3,9	3,2	2,5	1±0,2
Sb	2,0	0,6	0,7	0,5	0,5-2,0
As	Н.о./ DI	3,3	15,1	1,7	20±3
Cd	Н.о.	0,38	0,48	0,13	0,6±0,2
Th	Н.о.	14,2	9,6	13	3,5±0,7
U	Н.о./DI	4,3	4,1	2,5	Н.д./N.d.

Примечание: * – по Виноградову [39], ** – по Юдович, Кетрис [1]; Н.д. – нет данных, Н.о. – ниже предела обнаружения метода.

Note: * – according to Vinogradov [39], ** – according to Yudovich, Ketris [1]; N.d. – no data, DI – Below the detection limit.

педобиоты на исследуемых отвалах существует, поскольку ПДК мышьяка для грибов не превышает 0,5 мг/кг [41], для растений в токсичных грунтах – 20 мг/кг [42]. Исходя из обобщённой оценки ИПС [40], острые и хронические эффекты водной и наземной биоты наблюдались при содержании As от нескольких микрограммов до нескольких миллиграммов в 1 л среды (в зависимости от биологического вида и длительности воздействия). Эти эффекты включали в себя летальность, подавление роста, фотосинтеза и репродукции, а также изменение поведения, биоразнообразия. При высоких уровнях загрязнения сохранялись виды, отличающиеся резистентностью к As, что можно, по нашему мнению, отнести и к азотобактеру.

Помимо As, в антраците и эмбриозёмах нами обнаружены радиоактивные металлы – Th и U: значения Th оказались близкими к кларку, а U – в большинстве проб превысил его (табл. 3). Интересно, что Th и U обнаруживают тесную связь с органическим веществом углей: Th образует прочные органоминеральные комплексы, U связан с минеральными микровключениями и кластерами (до 70%) [3]. Торий и уран – это единственные природные радиоактивные элементы, чьи изотопы имеют периоды полураспада, сравнимые с возрастом Земли, поэтому сохранились на нашей планете со времён её формирования. Уран не относится к биофильным элементам, его коэффициент поглощения не превышает, как правило, 10^2 [2].

Судя по 100%-ной заселённости азотобактером мелкозёма лесовидного карбонатного суглинка и почвоподобных образований, а также подвижности инцистированных клеток через 24 часа термостатирования на фоне избытка мышьяка, можно предположить, что U и Th способствовали проявлению радиационного горемезиса. Горметический эффект, вероятно, не случаен. Бактериальная популяция, по-видимому, имеет в своём составе клетки с репарирующими механизмами, генетическим контролем, который выработался в процессе эволюции азотобактера при воздействии на него космических лучей и радиоактивных потоков, исходящих из земной коры. Доказано, что при определённой дозе облучения азотобактера происходит сильное увеличение клеток в размере, но азотфиксирующая активность при этом заметно не изменяется, значительная часть фиксированного азота переходит в растворимую фракцию.

Радиационная устойчивость обнаружена и у других представителей микробного мира.

В условиях естественной и искусственной радиации выживают целлюлозные бактерии, дрожжи, микромицеты, цианобактерии, водоросли. Важную протекторную роль в экстремальных условиях существования выполняют меланинсодержащие соединения, которые обеспечивают выживание, например, грибов в помещении разрушенного реактора Чернобыльской АЭС [43], в загрязнённых радиацией почвах, на расстоянии 10 км от реактора, – пигментированной бактерии р. *Methylobacterium* [44]. В жизнедеятельном состоянии азотобактер обнаружен на фоне радиации и в юго-восточной Азии [45].

Некоторые представители морской микробиоты, в том числе из р. *Azotobacter*, накапливают U в равновесной системе с Th [46]. Естественные радиоактивные элементы могут быть сосредоточены под клеточной оболочкой и на её стенках, в тонкой сфере или мономолекулярном слое различной плотности. В почвах под влиянием тория усиливается азотфиксация азотобактера, а у клубеньковых бактерий повышается способность проникать в ткани корней бобовых растений и образовывать клубеньки [47].

Анализ характера роста колоний азотобактера в наших объектах, показал, что в суглинке, где отсутствовали U и Th, а также As, преобладал мицелиевидный тип роста, в выветренном антраците, содержащем эти элементы, – плоский тип с ослизнением, в эмбриозёмах, где пул As был особенно велик – преобладал ризоидный тип роста с ослизнением (рис. 2). Во всех случаях рост сопровождался выделением в окружающую среду метаболитов, имеющих жёлтые, красные, оранжевые тона, возможно, меланиновой и каротиноидной природы, особенно обильных в выветренном антраците. У гетеротрофных бактерий подобные пигменты выполняют функцию защиты от повреждающего действия видимых и ультрафиолетовых лучей. Следовательно, старовозрастные отвалы антрацита жизнепригодны для аэробной свободноживущей бактерии *Azotobacter chroococcum*. Надо полагать, что включение азотобактера в инновационные технологии, предназначенные для биологической рекультивации углеотвалов, окажется перспективным.

Заключение

Полученные данные позволяют говорить о повсеместной колонизации старовозрастных отвалов аэробной азотфиксирующей бактери-

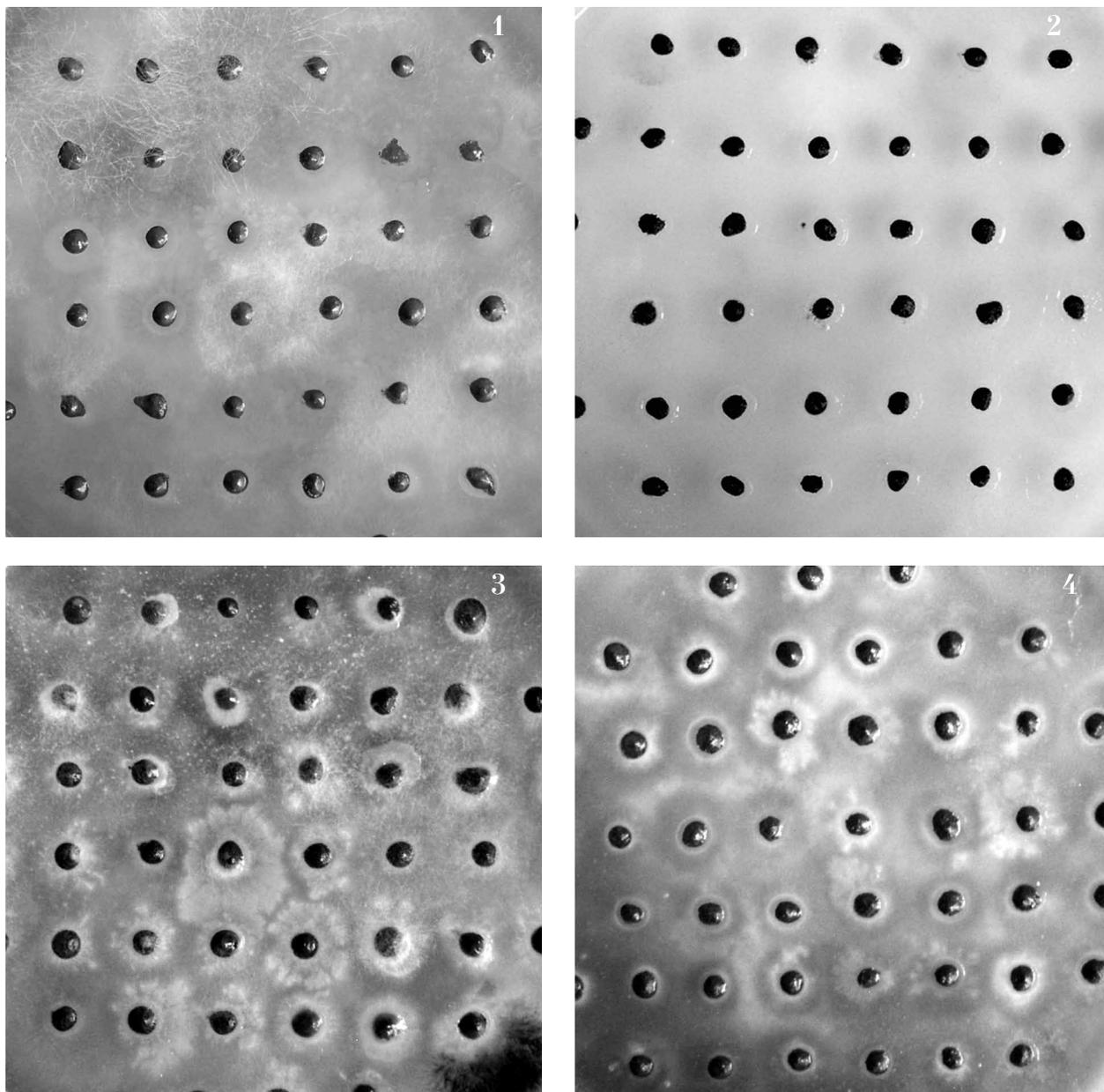


Рис. 2. Полиморфизм *Azotobacter chroococcum* в мелкозёме старовозрастного отвала:
 1 – лёссовидный карбонатный суглинок; 2 – выветренный антрацит; 3, 4 – эмбриозём
Fig. 2. Polymorphism of *Azotobacter chroococcum* in fine-grained old age dump:
 1 – loess-like carbonate loam; 2 – weathered anthracite; 3, 4 – embryozem

ей *Azotobacter chroococcum*, чему способствует гетерогенность популяции.

В почвообразующей породе – лёссовидном карбонатном суглинке, где имеется максимальный запас жизненно важных элементов питания, особенно Мо и Са, активно развиваются штаммы с мицелиевидным характером роста, обеспечивающим быстрое распространение по поверхности минерального субстрата и формирование в нём биогенных свойств. В эмбриозёмах и выветренном антраците, где присутствуют As, тяжёлые и радиоактивные металлы, наследованные от углистых частиц, рост азотобактера снижается. Преобладаю-

щий характер роста его колоний ризоидный. Схожую реакцию на радиацию и токсиканты обнаружили ранее некоторые представители Cyanophyta [48]. Полученные результаты расширяют знания об экологии азотобактера, открывают перспективы для дальнейшего углублённого мониторинга его реакций на геохимическое окружение, а также для разработки научных основ применения бактерии в технологиях ускорения почвообразования на поверхности техногенных отходов.

Месторождения каменных углей, в том числе антрацита, – это национальное природное богатство России, высокий энергетический

и редкометальный потенциал страны, поэтому многоцелевая добыча полезных ископаемых неизбежно ведёт к увеличению почвенных потерь. Сведения об эколого-геохимических особенностях вскрышных пород углей и формировании в них биогенных свойств пока единичны, что, возможно, свидетельствует о недостаточном внимании к среде обитания всего живого. Полученные данные об особенностях развития азотобактера на старовозрастных отвалах метаморфита частично восполняют этот пробел, подтверждают необходимость проведения комплексного эколого-биогеохимического мониторинга техногенных ландшафтов, выявления специфики перехода предпочвы в почву с учётом метаморфизма углей.

Работа выполнена в рамках проектов НИР ИПА СО РАН VI.3 и ИНГГ СО РАН IX.138.3.1, при частичной финансовой поддержке РФФИ (грант № 17-05-00056).

Литература

1. Юдович Я.Э., Кетрис М.П. Неорганическое вещество углей. Екатеринбург: УрО РАН, 2002. 422 с.
2. Юдович Я.Э., Кетрис М.П. Токсичные элементы – примеси в ископаемых углях. Екатеринбург: УрО РАН, 2005. 655 с.
3. Арбузов С.И., Ершов В.В. Геохимия редких элементов в углях Сибири. Томск: Д-Принт, 2007. 468 с.
4. Постановление Главного санитарного врача РФ от 28 августа 2017 г. № 120 «Об установлении размера санитарно-защитной зоны для имущественного комплекса горнотранспортной части Ургунского участка разреза «Горловский» ЗАО «Сибирский антрацит», расположенного на территории Искитимского района Новосибирской области». [Электронный ресурс] http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_278339/ (Дата обращения: 02.10.2017).
5. Придачина Н.Н. Биологически активные вещества из клеточных липидов азотфиксирующей бактерии *Azotobacter chroococcum*: Дисс. ... канд. биол. наук. М., 1984. 146 с.
6. Ebrahimi S., Iran Nejad H., Shirani Rad A.Y., Abbas Akbari G., Amiry R., Modarres Sanavy S.A.M. Effect of *Azotobacter chroococcum* application on quantity and quality forage of rapeseed cultivars // Pakistan Journal of Biological Sciences. 2007. No. 10. P. 3126–3130.
7. Akond Ali M., Mubassara S., Rahman Motiur M. Distribution and abundance of *Azotobacter* in wheat fields of Bangladesh // Bangladesh Journal of Microbiology. 2007. V. 24. No. 2. [Электронный ресурс] <http://dx.doi.org/10.3329/bjm.v24i2.1262> (Дата обращения: 17.01.2018).
8. Ramakrishnaian G., Vijaya T., Mouli Chandra K. Studies on effect of VAM, phosphate solubilization bacteria

and *Azotobacter* on biochemical aspects of *Stevia rebaudiana* (Bert.) – an emerging nutraceutical plant // Asian Journal of Microbiology, Biotechnology and Environmental Sciences Paper. 2010. V. 12. No. 1. P. 19–22.

9. Sabeti Amirhanded M.A. Effect of nitrogen fertilizer and *Azotobacter chroococcum* on yield and nitrogen content of flue-cure Tobacco leaf // Proceedings of State Agrarian University of Armenia. 2011. No. 2. P. 46–49.
10. Khan S., Pariari A. Effect of N-fixing biofertilizers on growth, yield and quality of Chilli (*Capsicum annum L.*) // The Bioscan an International Quarterly Journal of Life Sciences. 2012. V. 7 (3). P. 481–482.
11. Jnavali A.D., Ojha R.B., Marahatta S. Role of *Azotobacter* in soil fertility and sustainability – a review // Advantes in Plants and Agriculture Research. 2015. V. 2 (6). P. 1–5.
12. Amirhandeh M.S., Nosratabad A.F., Norouzi M., Yaryutyunyan S. Response of coker (flue-cured) tobacco (*Nicotiana tabacum*) to inoculation with *Azotobacter chroococcum* at various levels of nitrogen fertilization // Australian Journal of Crop Science. 2012. V. 6 (5). P. 861–868.
13. Soleimanzadeh Y., Gooshchi F. Effect of *Azotobacter* and nitrogen chemical fertilizer on yield components of wheat (*Triticum aestivum L.*) // World Applied Sciences Journal. 2013. V. 21 (8). P. 1176–1180.
14. Ghalem M., Tifrit A., Daouadji K.L., Labdi M., Abbouni B. Effect of diazotrophic plant growth promoting rhizobacteria on seed germination of chickpea (*Cicera rietinum L.*) // Der Pharmacia Lettre. 2015. V. 7 (10). P. 202–210.
15. Мацкова Ю.А., Олюнина Л.Н., Сухов В.С., Неруш В.Н., Сеницына Ю.В., Веселов А.П. Влияние продуцирующих индолил-3-уксусную кислоту бактерий *Azotobacter chroococcum* 66 и *Pseudomonas putida* NBR 9 на термоустойчивость проростков пшеницы (*Triticum aestivum L.*) // Фундаментальные исследования. 2015. № 7–4. С. 682–686.
16. Sokolova M.G., Akomova G.P., Verkhoturov V.V., Vaishila O.B. Aminoacid composition of wheat grain gluten under microbe impact // Journal of Stress Physiology and Biochemistry. 2012. V. 8. No. 4. P. 16–26.
17. Емцев В.Т., Чумаков М.И. Об эффективности азотфиксирующего ассоциативного симбиоза у небобовых растений // Почвоведение. 1990. № 11. С. 116–126.
18. Новикова Т.И., Аветисов Л.А. Физиолого-биохимические аспекты симбиоза // Биологическая фиксация азота. Новосибирск: Наука, 1991. С. 95–139.
19. Новикова Т.И. Структурно-функциональные особенности бобово-ризобияльного симбиоза: Автореф. ... докт. биол. наук. Новосибирск, 2004. 32 с.
20. Трофимов С.С., Наплёкова Н.Н., Кандрашин Е.Р., Фаткулин Ф.А., Стебаева С.К. Гумусообразование в техногенных экосистемах. Новосибирск: Наука, 1986. 165 с.
21. Сассон А. Биотехнология: свершения и надежды. М.: Мир, 1987. 411 с.

22. Dalovic I., Josic D., Mrkovacki N., Pivic R., Bekavac G., Jockovic D. The Competitiveness of *Azotobacter*, *Pseudomonas* and *Bacillus* applied as a mixture inoculum in rhizosphere of five vaize genotyping and phenotyping methods // IV International Symposium "Agrosym 2013". P. 382–385.
23. Chen J.H., Czajka D.R., Lion L.W., Shuler M.L., Ghiorse W.C. Trace metal mobilization in soil by bacterial polymers // *Environmental Health Perspectives*. 1995. V. 103. No. 1. С. 53–58.
24. Pathan A.N., Pethe A.S. Studies of melanin producing bacteria and extraction of bacterial melanin from sewage water // *International Journal of Applied Research*. 2016. V. 2 (6). P. 413–415.
25. Shivprasad S., Page W.J. Catechol formatio and melanization by Na⁺-dependent *Azotobacter chroococcum*: protective mechanism for aeroadaptation? // *Applied and Environmental Microbiology*. 1989. V. 55. No. 7. P. 1811–1817.
26. Boyd W.L., Boyd J.W. Presence of *Azotobacter* species in Polar Regions // *Journal of Bacteriology*. 1962. V. 83. No. 2. P. 429–430.
27. Moreno J., Gonzalez-Lopez J., Vela G.R. Survival of *Azotobacter* spp. in dry soils // *Applied and Environmental Microbiology*. 1986. V. 51. No. 1. P. 123–125.
28. Придачина Н.Н., Новогрудская Е.Д., Чекакина Е.В., Круляк Е.Б., Батраков С.Г. *Azotobacter chroococcum* – продуцент нового противогрибкового антибиотика // *Антибиотики*. 1982. № 1. С. 3–5.
29. Kumari Lakshmi M., Vijayalashmi V., Subba Rao N.S. Interaction between *Azotobacter* species and fungi // *Phytopathol*. 1972. V. 75. P. 27–30.
30. Gospodaryov D., Lushchak V. Some properties of melanin produced by *Azotobacter chroococcum* and its possible application in biotechnology // *Biotechnologia Acta*. 2011. V. 4. No. 2. P. 61–69.
31. Rasulov B.A., Ksanov R.K., Pattaeva M.A., Khokhlacheva V.E., Begmatova G.N. Syntesis of silver nanoparticles based on the exopolisaccharide of *Azotobacter chroococcum* 79 (1) and their antifungal activity // *Academy of sciences of the republic of Uzbekistan. Contents and annotations*. 2016. No. 2 [Электронный ресурс] <http://academy.uz/en/news/163> (Дата обращения: 15.01.2018).
32. Shirkhani A., Nasrolahzadeh S. Vermicompost and *Azotobacter* as an ecological pathway to decrease chemical fertilizers in the maize, *Zea mays* // *Biosci. Biotech. Res. Comm*. 2016. V. 9 (3). P. 382–390.
33. Galehdari H., Alae S., Mirzaee M. Cloning of poly (3-hydroxybutyrate) synthesis genes from *Azotodacter vinelandii* into *Escherichia coli* // *Jundishapur Journal of Microbiology*. 2009. V. 2 (1). P. 31–35.
34. Шильникова В.К. Бактерии и актиномицеты / Жизнь растений. Т. I. М.: Просвещение, 1974. С. 377–384.
35. Виноградский С.Н. Микробиология почвы (проблемы и методы). М.: Академия наук СССР, 1952. 792 с.
36. Тихова В.Д., Фадеева В.П. Анализ состава и структурных особенностей гуминовых кислот, почв, торфов и углей Сибирского региона / *Химический анализ в геологии и геохимии*. Новосибирск, 2016. С. 518–542.
37. Постникова М.А. Использование гуминовых кислот почвенными бактериями: Автореф. ... дис. канд. биол. наук. М., 2007. 25 с.
38. Артамонова В.С., Бортникова С.Б., Оплеухин А.А. Техногенное загрязнение почв подотвальными водами в районе угледобычи // *Известия Коми УрО РАН*. 2016. № 4 (28). С. 38–45.
39. Виноградов А.П. Среднее содержание химических элементов в главных типах изверженных горных пород земной коры // *Геохимия*. 1962. № 7. С. 555–571.
40. Мышьяк и его соединения [Электронный ресурс] <http://toxi.dyndns.org/base/nonorganic/Arsenicum.htm> / Дата обращения: 14.09.2017)
41. СанПин 2.3.2.1078-01. Гигиенические требования безопасности и пищевой ценности пищевых продуктов. М., 2002. 273 с.
42. Методические указания по оценке городских почв при разработке градостроительной и архитектурно-строительной документации. М., 1996. 17 с.
43. Гесслер Н.Н., Егорова А.С., Белозерская Т.А. Меланиновые пигменты грибов в экстремальных условиях существования (обзор) // *Прикладная биохимия и микробиология*. 2014. Т. 50. № 2. С. 125–134.
44. Romanovskaya V.V., Malashenko Y.R., Sokolov I.G. Influence of prolonged nuclear radiation as result of Chernobyl accident on diversity of soil bacteria // *Abstr. International union of microbiological societies. IUMS CONGRESSES – 1996; 8th International congress of bacteriology and applied microbiology division*. Jerusalem, Israel, 1996. P. 74.
45. Summary of country reports on production of super water absorbent (SWA) by radiation processing [Электронный ресурс] www.fnca.mext.go.jp/english/cb/e_ws_2012_3b. (Дата обращения: 17.01.2018).
46. Пшенин Л.Н. Биология морских азотфиксаторов. Киев: Наукова думка. 1966. 267 с.
47. Красильников Н.А. Микроорганизмы почвы и высшие растения. М.: Изд-во АН СССР. 1958. 564 с.
48. Шестаков С.В. Мутационная изменчивость синезелёных водорослей / *Актуальные проблемы биологии синезелёных водорослей*. М.: Наука, 1974. С. 18–37.

References

1. Yudovich Ya.E., Ketris M.P. Inorganic matter of coals. Ekaterinburg: PH UrO RAS, 2002. 422 p. (in Russian).
2. Yudovich Ya.E., Ketris M.P. Toxic and potentially toxic elements of fossil coals. Ekaterinburg: PH UrO RAS. 2005. 655 p. (in Russian).
3. Arbutov S.I., Ershov V.V. Geochemistry of rare elements in coals of Siberia. Tomsk: PH «Print», 2007. 468 p. (in Russian).

4. Resolution of the Main State Sanitary Physician of the RF, August 28, 2017 No. 120 "On establishment of size of the sanitary protection zone for the property complex of the Urgun mining section of the "Gorlovsky" section of the Siberian Anthracite CJSC located in the Iskitimsky district of the Novosibirsk Region [Internet resource] http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_278339/ (Accessed: 02.10.2017) (in Russian).
5. Pridachina N.N. Biologically active substances from cellular lipids of nitrogen-fixing bacteria *Azotobacter chroococcum*: Diss. ... kand. biol. nauk. Moskva, 1984. 146 p. (in Russian).
6. Ebrahimi S., Iran Nejad H., Shirani Rad A.Y., Abbas Akbari G., Amiry R., Modarres Sanavy S.A.M. Effect of *Azotobacter chroococcum* application on quantity and quality forage of rapeseed cultivars // Pakistan Journal of Biological Sciences. 2007. No. 10. P. 3126–3130.
7. Akond Ali M., Mubassara S., Rahman Motiur M. Distribution and abundance of *Azotobacter* in wheat fields of Bangladesh // Bangladesh Journal of Microbiology. 2007. V. 24. No. 2. [Internet resource] <http://dx.doi.org/10.3329/bjm.v24i2.1262> (Accessed: 17.01.2018).
8. Ramakrishnaian G., Vijava T., Mouli Chandra K. Studies on effect of VAM, phosphate solubilization bacteria and *Azotobacter* on biochemical aspects of *Stevia rebaudiana* (Bert.) – an emerging nutraceutical plant // Asian Journal of Microbiology, Biotechnology And Environmental Sciences Paper. 2010. V. 12. No. 1. P. 19–22.
9. Sabeti Amirhanded M.A. Effect of nitrogen fertilizer and *Azotobacter chroococcum* on yield and nitrogen content of flue-cure Tobacco leaf // Proceedings of State Agrarian University of Armenia. 2011. No. 2. P. 46–49.
10. Khan S., Pariari A. Effect of N-fixing biofertilizers on growth, yield and quality of Chilli (*Capsicum annum L.*) // The Bioscan an International Quarterly Journal of Life Sciences. 2012. V. 7 (3). P. 481–482.
11. Jnavali A.D., Ojha R.B., Marahatta S. Role of *Azotobacter* in soil fertility and sustainability-a review // Advances in Plants and Agriculture Research. 2015. V. 2 (6). P. 1–5.
12. Amirhandeh M.S., Nosratabad A.F., Norouzi M., Yaryutyunyan S. Response of coker (flue-cured) tobacco (*Nicotiana tabacum*) to inoculation with *Azotobacter chroococcum* at various levels of nitrogen fertilization // Australian Journal of Crop Science. 2012. V. 6 (5). P. 861–868.
13. Soleimanzadeh Y., Gooshchi F. Effect of *Azotobacter* and nitrogen chemical fertilizer on yield components of wheat (*Triticum aestivum L.*) // World Applied Sciences Journal. 2013. V. 21 (8). P. 1176–1180.
14. Ghalem M., Tifrit A., Daouadji K.L., Labdi M., Abbouni B. Effect of diazotrophic plant growth promoting rhizobacteria on seed germination of chickpea (*Cicer arietinum L.*) // Der Pharmacia Lettre. 2015. V. 7 (10). P. 202–210.
15. Matskova Yu.A., Olyunina L.N., Sukhov V.S., Nerush V.N., Sinityna Yu.V., Veselov A.P. Influence of indole-3-acetic acid-producing bacteria *Azotobacter chroococcum* 66 and *Pseudomonas putida* NBR9 on the heat resistance of wheat germs (*Triticum aestivum L.*) // Fundamentalnyye issledovaniya. 2015. No. 7–4. P. 682–686 (in Russian).
16. Sokolova M.G., Akomova G.P., Verkhoturov V.V., Vaishila O.B. Aminoacid composition of wheat grain gluten under microbe impact // Journal of Stress Physiology and Biochemistry. 2012. V. 8. No. 4. P. 16–26 (in Russian).
17. Emtsev V.T., Chumakov M.I. On the effectiveness of nitrogen-fixing associative symbiosis in non-sky plants // Pochvovedenie. 1990. No. 11. P. 116–126 (in Russian).
18. Avetisov L.A. Physiological and biochemical aspects of symbiosis / Biological fixation of nitrogen. Novosibirsk: Nauka, 1991. P. 95–138 (in Russian).
19. Novikova T.I. The Structural and functional properties of leguminose-rhizobial symbiosis: Avtoref. ... doct. biol. nauk. Novosibirsk, 2004. 32 p. (in Russian).
20. Trofimov S.S., Naplekova N.N., Kandrashin E.R., Fatkulin F.A., Stebaeva S.K. Humus formation in technogenic ecosystems. Novosibirsk: Nauka, 1986. 165 p. (in Russian).
21. Sasson A. Biotechnology: accomplishments and hopes. Moskva: Mir, 1987. P. 151–195 (in Russian).
22. Dalović I., Josić D., MRkovački N., Pivić R., Bekavac G., Jocković D. The competitiveness of *Azotobacter*, *Pseudomonas* and *Bacillus* applied as a mixture inoculum in rhizosphere of five vicia genotyping and phenotyping methods // IV International Symposium «Agrosym 2013». P. 382–385.
23. Chen J.H., Czajka D.R., Lion L.W., Shuler M.L., Ghiorse W.C. Trace metal mobilization in soil by bacterial polymers // Environmental Health Perspectives. 1995. V. 103. No. 1. P. 53–58.
24. Pathan A.N., Pethe A.S. Studies of melanin producing bacteria and extraction of bacterial melanin from sewage water // International Journal of Applied Research. 2016. V. 2 (6). P. 413–415.
25. Shivprasad S., Page W.J. Catechol Formation and melanization by Na⁺-dependent *Azotobacter chroococcum*: Protective mechanism for aeroadaptation? // Applied and Environmental Microbiology. 1989. V. 55. No. 7. P. 1811–1817.
26. Boyd W.L., Boyd J.W. Presence of *Azotobacter* species in Polar Regions // Journal of Bacteriology. 1962. V. 83. No. 2. P. 429–430
27. Moreno J., Gonzalez-Lopez J., Vela G.R. Survival of *Azotobacter* spp. in dry Soils // Applied and Environmental Microbiology. 1986. V. 51. No. 1. P. 123–125.
28. Pridachina N.N., Novogrudskaia E.D., Chekasina E.V., Kruglyak E.B., Batrakov S.G. *Azotobacter chroococcum* – producer of a new antifungal antibiotic // Antibiotiki. 1982. No. 1. P. 3–5 (in Russian).
29. Kumari Lakshmi M., Vijayalashmi V., Subba Rao N.S. Interaction between *Azotobacter* species and fungi // Phytopathol. 1972. V. 75. P. 27–30.

30. Rasulov B.A., Ksanov R.K., Pattaeva M.A., Khokhlacheva V.E., Begmatova G.N. Synthesis of silver nanoparticles based on the exopolysaccharide of *Azotobacter chroococcum* 79 (1) and their antifungal activity // Academy of Sciences of the republic of Uzbekistan. Contents and annotations. 2016. No. 2 [Internet resource] <http://academy.uz/en/news/163> ((Accessed: 15.01.2018).
31. Shirkhani A., Nasrolahzadeh S. Vermicompost and *Azotobacter* as an ecological pathway to decrease chemical fertilizers in the maize, *Zea mays* // Biosci. Biotech. Res. Comm. 2016. V. 9 (3). P. 382–390.
32. Gospodaryov D., Lushchak V. Some properties of melanin produced by *Azotobacter chroococcum* and its possible application in biotechnology // Biotechnologia Acta. 2011. V. 4. No. 2. P. 61–69.
33. Galehdari H., Alae S., Mirzaee M. Cloning of poly (3-hydroxybutyrate) synthesis genes from *Azotodacter vinelandii* into *Escherichia coli* // Jundishapur Journal of Microbiology. 2009. V. 2 (1). P. 31–35.
34. Shilnikova V.K. Bacteria and actinomycetes / Life of plants. T. I. Moskva: PH «Prosveshchenie», 1974. P. 377–384. (in Russian).
35. Vinogradsky S.N. Microbiology of soil (problems and methods). Moskva: AS USSR, 1952. 792 p. (in Russian).
36. Tichova V.D., Fadeeva V.P. Analysis of the composition and structural features of humic acids, soils, peats and coals of the Siberian region / Chemical analysis in geology and geochemistry. Novosibirsk: Geo, 2016. P. 518–542 (in Russian).
37. Postnikova M.A. The use of humic acids by soil bacteria: Avtoref. ... kand. biol. nauk. Moskva, 2007. 25 p. (in Russian).
38. Artamonova V.S., Bortnikova S.B., Opleuchin A.B. Technogenic contamination of soils by drainage water in the area of coal mining // Izvestiya Komi UrO RAS. 2016. No. 4 (28). P. 38–45 (in Russian).
39. Vinogradov A.P. The average content of chemical elements in the main types of igneous rocks of the earth's crust // Geochimiya. 1962. No. 7. P. 555–571 (in Russian).
40. Arsenic and its compounds [Internet resource] <http://toxi.dyndns.org/base/nonorganic/Arsenicum.htm/> (Accessed: 14.09.2017).
41. SanPin 2.3.2.1078-01. Hygienic requirements for food safety and nutritional value. Moskva, 2002. 273 p. (in Russian).
42. Methodical guidelines for the evaluation of urban soils in the development of urban planning and architectural and construction documentation. Moskva, 1996. 17 p. (in Russian).
43. Gessler N.N., Egorova A.S., Belozerskaya T.A. Melanin pigments of fungi in extreme conditions of existence (review) // Applied Biochemistry and Microbiology. 2014. V. 50. No. 2. P. 125–134 (in Russian).
44. Romanovskaya V.V., Malashenko Y.R., Sokolov I.G. Influence of prolonged nuclear radiation as result of Chernobyl accident on diversity of soil bacteria // Abstr. International union of microbiological societies. IUMS CONGRESSES – 1996; 8th International congress of bacteriology and applied microbiology division. Jerusalem, Israel, 1996. P. 74.
45. Summary of country reports on production of super water absorbent (SWA) by radiation processing [Internet resource] http://www.fnca.mext.go.jp/english/cb/e_ws_2012_3b. (Accessed: 17.01.2018).
46. Pshenin L.N. Biology of marine nitrogen fixators. Kiev: Naukova dumka, 1966. 267 p. (in Russian).
47. Krasilnikov A.P., Romanovskaya T.R. Microbiological dictionary-guide. Minsk: Asar, 1999. 400 p. (in Russian).
48. Shestakov S.V. Mutational variability of blue-green algae / Actual problems of biology of blue-green algae. Moskva: Nauka, 1974. P. 18–37.

УДК 581.55 (234.851)

Особенности состава и структуры сообществ с участием *Acomastylis glacialis* на границе ареала (Приполярный Урал)

© 2017. Е. Е. Кулюгина, к. б. н., н. с.,

Институт биологии Коми научного центра Уральского отделения РАН,
167982, Россия, г. Сыктывкар, ул. Коммунистическая, 28,
e-mail: kulugina@ib.komisc.ru

Обследованы сообщества *Carex arctisibirica* – *Acomastylis glacialis* – *Alectoria ochroleuca*, расположенные на вершине горы Баркова (западный макросклон Приполярного Урала), находящиеся на западной границе ареала *Acomastylis glacialis*. Выявлены видовой состав, структура, экологическая приуроченность и отличительные особенности фитоценозов: высокое таксономическое разнообразие (132 вида) и видовая насыщенность (51), что в 1,5–2 выше по сравнению с аналогичными сообществами в смежных к району исследований регионах; преобладание по числу видов и покрытию споровых растений; произрастание значительного числа (21) редких в Республике Коми видов. Полученные нами данные о составе и структуре исследуемых сообществ дополняют опубликованные данные по растительности горных тундр Приполярного Урала и важны для сохранения уникальных экосистем данного региона. Принадлежность данного синтаксона к высшим единицам пока остается открытой.

Ключевые слова: Приполярный Урал, гольцовый пояс, сообщества с *Acomastylis glacialis* на границе ареала.

Features of the composition and structure of communities with *Acomastylis glacialis* in the area border (Subpolar Urals)

E. E. Kulyugina,

Institute of Biology of the Komi Science Centre of the Ural Division RAS,
28 Kommunisticheskaya St., Syktyvkar, Russia, 167982,
e-mail: kulugina@ib.komisc.ru

Vegetation of the west macroslope in the highest part of Subpolar Urals that includes Barkova Mountain is understudied. *Acomastylis glacialis* is rare plant species in the Komi Republic of Russia living here at its border of distribution area. It was found in the rocky mountain belt of several peaks upstream the Kozhim River and the Schugor River. Vegetation of the Barkova Mountain was studied in 2012 and 2015. Rocky mountain deserts are mixed here with mountain tundra communities including herb-lichen ones where *Acomastylis glacialis* is relevant. 132 species (48 vascular plants, 25 mosses and 59 lichens) were revealed in the model community type *Carex arctisibirica* – *Acomastylis glacialis* – *Alectoria ochroleuca* located in the rocky mountain belt at the terrace on the top of the mountain and border slopes (1272–1321 m above sea level). Species richness is high (41–60 species). This is 1.5–2 times higher than in other bordering regions. Diagnostic species besides *Acomastylis glacialis* are presented by taxa with high (*Carex arctisibirica*, *Poa arctica*, *Cladonia mitis*, *Rhytidium rugosum*, *Lagotis minor*, *Cladonia coccifera*, *Valeriana capitata*, *Solorina crocea*, *Rhodiola quadrifida*, *Myosotis asiatica*, *Bryoria nitidula*, *Salix numullaria*, *Stellaria peduncularis*, *Hylocomium splendens* and *Ptilidium ciliare*) and average (*Lusula nivalis*, *Polemonium boreale*, *Tephrosia atropurpurea*, *Politrichum juniperinum* and *Eritrichium villosum*) abundance that occur rarely in the bordering regions. Total projective cover varied from 50 to 98%; vegetation plots are mixed with stones. Groups of *Acomastylis glacialis* are mixed with sites covered by lichens and *Carex arctisibirica*. Height of herbal plants is 15 cm, lichens – 5 cm. Specific feature of the studied communities is an occurrence of 21 vascular plant species protected in the Komi Republic. The data on composition and structure of communities *Carex arctisibirica* – *Acomastylis glacialis* – *Alectoria ochroleuca* add current information about mountain tundra vegetation of the Subpolar Urals are important for preservation these unique regional ecosystems. Classification of the community in the system of highest syntaxonomic units is still under discussion.

Keywords: Subpolar Urals, mountain tundra belt, *Acomastylis glacialis*, border of area.

До настоящего времени растительность западного макросклона в самой высокогорной части Приполярного Урала, к которой относится и г. Баркова, остается малоизученной. На этой горе, названной в честь известного географа А.С. Баркова (1873–1953) (1320 м над у. м.) расположено одно из крупнейших в мире месторождений горного хрусталя – «Желанное». В настоящее время ведётся его промышленная разработка. Несмотря на это, гора является одним из интереснейших мест Приполярного Урала, сочетающего в себе уникальность растительного покрова, ценного в научном отношении, живописных ландшафтов и геологических ценностей, скрытых в её глубине. Первые флористические сведения, включая находки редких видов, датируются 1972 г. [1].

Acomastylis glacialis (Adams) A. Khokhr. – азиатско-американский горный вид, обитающий в арктических и высокогорных тундрах [2–11]. На Приполярном Урале он растёт на западной границе своего ареала, где обитает в горных тундрах гольцового пояса. На территории Республики Коми (РК) – крайне редок и занесён в региональную Красную книгу [12]. Данный вид найден на территории национального парка «Югыд-Ва»: в обследованных частях западного макросклона Приполярного Урала – в верхнем течении р. Кожим, на горах: Баркова, Народная, Манарага, Сана-Из и хребтах Сабля и Росомахи [13–15]; в 2017 г. обнаружен и на Северном Урале (хр. Тельпосиз) на высоте 1200 м н. у. м. Гербарные образцы хранятся в УНУ «Научный гербарий СУКО ФГБУН Института биологии Коми НЦ УрО РАН». Его ценопопуляции на г. Баркова занимают большую площадь, насчитывая до 1,5 тысяч особей, которые возобновляются за счёт семян [14]. Высокие показатели активности данного растения зафиксированы и для гольцового пояса северо-западной части плато Путорана [24]. Этот вид относится к сильным тундровым эдификаторам, поскольку обладает средообразующими способностями: притеняет и увеличивает влажность субстрата, под старыми особями образуются торфяные «карманы» до 6 см толщины с изменённой кислотностью, смягчается температурный режим. В результате этих процессов увеличивается микробное население и численность беспозвоночных животных субстрата, приводящее в дальнейшем к изменениям свойств почвы и позволяющим этой многолетней траве жить удивительно продолжительное время – до 143 лет, образуя длительно существующие фитоценозы в пределах ареала своего обитания [16, 17].

К настоящему времени есть ряд публикаций, содержащих сведения по растительности северной части Приполярного Урала [15, 18, 19], однако в них отсутствует информация о сообществах с участием *Acomastylis glacialis*. В ряде статей опубликованы описания [20–23], остальные – включают краткие сведения из высокоарктических и высокогорных областей: смежных к району нашего исследования (табл. 1) [16, 17, 24, 25] и расположенных на Аляске [4, 6, 26]. Целью работы было исследовать сообщества гольцового пояса г. Баркова с участием *Acomastylis glacialis*, находящихся на западной границе распространения: их состав, структуру, особенности, эктопическую приуроченность.

Объекты и методы исследования

Полевые исследования флоры и растительности осуществляли в период 2005–2015 гг., растительные сообщества гольцового пояса горы обследовали в 2012 и 2015 гг. За этот период выполнено 9 геоботанических описаний сообществ с участием *Acomastylis glacialis*, которые сделаны по общепринятым геоботаническим методикам на пробных площадях 25 м². Обработка описаний проведена в соответствии с подходами школы Браун-Бланке [27, 28], широко используемой при исследованиях в Арктической зоне как в России [20, 22], так и за рубежом [23, 29], в программе Excel на основе коэффициента Съеренсена-Чекановского с учётом проективного покрытия видов. Для ординации сообществ использовали алгоритм анализа данных NMS (nonmetric multidimensional scaling), реализованный в модуле «GRAPHS» [30].

Результаты и обсуждение

На горе Баркова развиты горно-тундровый (650–900 м над у. м.) и гольцовый пояса (с 900 м над у. м.) растительности. Ландшафтный вид гольцового пояса представлен каменистыми пустошами, перемежающимися с участками горно-тундровых сообществ: в увлажнённых экотопах – осоково-моховых (с доминированием *Carex arctisibirica*), осоково-ивково-моховых, а в местах с хорошим дренажом: травяно-лишайниковых, кустарничково-лишайниковых, лишайниковых и каменистых горных тундр, а также нивальных луговин [1, 14, 19]. В покрове травяно-лишайниковых тундр гольцового пояса на г. Баркова значительно участие *Acomastylis glacialis*. Всего

Таблица / Table

Характеристика сообществ с существенным ценозическим участием в них *Acomastylis glacialis*
Parameters of communities with significant role of *Acomastylis glacialis*

№	Название сообщества Association/community type	Зональное положение/ высотный пояс zonal position/altitudinal belt	Высота, м н. у. м. elevation, m	Размер пробной площади, м ² size of releve, m ²	ОПП, % Total projective cover, %	Видовая насыщен- ность, шт. Species number
1	<i>Novosiversia glacialis</i> – <i>Polytrichum strictum</i> [20]	южная полоса полярных пустынь / southern belt of polar deserts	130	25	8	23
2	Кустарничково-лишайниково-моховая тундра [21] Dwarf shrub-lichen-moss tundra	типичные тундры / гольцовый typical tundra / mountain rocky deserts	500–650	100	70	35
3	<i>Carex arctisibirica</i> – <i>Acomastylis glacialis</i> – <i>Alectoria ochroleuca</i> [31]	крайнесеверная тайга / гольцовый far northern taiga / mountain rocky deserts	1272– 1330	25	50–98	41–60
4	<i>Вьюсауло divergens</i> – <i>Vaccinietum uliginosii</i> субасс. <i>Typicum</i> (дриадово-цетрариевые тундры) [22] <i>Dryas-Cetraria</i> tundra	экотонная полоса: лесотундра-тундра ecotone: forest-tundra – tundra	79	100	85–100	28–31
5	Лишайниково-сиверсиево-ивковая; мохово- лишайниково-сиверсиевая; мохово-сиверсиево- ивковая [25] Lichen-novosiversia-salix; moss-lichen-novosiversia; moss-novosiversia-salix tundra	арктическая тундра arctic tundra	–	–	60–80	16
6	Мохово-лишайниковые тундры с <i>Acomastylis glacialis</i> [21] Moss-lichen tundra with beds of <i>Acomastylis glacialis</i>	типичные тундры / гольцовый typical tundra / mountain rocky deserts	650	100	70–80	–
7	Куртинные тундры формации <i>Dryas octopetala</i> [16, 24] Bed tundra from the formation <i>Dryas octopetala</i>	граница тайга- тундра / гольцовый border between taiga and tundra / mountain rocky deserts	650–950	100	20–100	4–23

в сообществах *Carex arctisibirica* – *Acomastylis glacialis* – *Alectoria ochroleuca* выявлено 132 вида растений (48 – сосудистых, 25 – мохообразных, 59 – лишайников). Видовая насыщенность фитоценозов составляет 41–60, в том числе: 10–26 – сосудистых, 2–10 – мхов, 22–31 – лишайников. Это в 1,5–2 выше по сравнению с другими смежными регионами (табл. 1). Споровые превосходят сосудистые растения по видовому разнообразию. Насчитывается 20 видов с высокой (V класс) константностью. Это и ценотически значимые виды: *Carex arctisibirica*, *Acomastylis glacialis*, *Poa arctica*, *Alectoria ochroleuca*, *Flavocetraria nivalis*, и таксоны, имеющие низкое покрытие (до 5%): *Salix numullaria*, *Stellaria peduncularis*, *Rhytidium rugosum*, *Bryoria nitidula*, *Bryocaulon divergens* и др. 48 видов данных сообществ имеют низкую константность (I класс). Наиболее обильные виды имеют высокую сопряжённость с *Acomastylis glacialis* (рис. 1). Диагностическую комбинацию составляют, кроме *Acomastylis glacialis*, таксоны с высокой (*Carex arctisibirica*, *Poa arctica*, *Cladonia mitis*, *Rhytidium rugosum*, *Lagotis minor*, *Cladonia coccifera*, *Valeriana capitata*, *Solorina crocea*, *Rhodiola quadrifida*, *Myosotis asiatica*, *Bryoria nitidula*, *Salix numullaria*, *Stellaria peduncularis*, *Hylocomium splendens*, *Ptilidium ciliare*) и со средней (*Lusula nivalis*, *Polemonium boreale*, *Tephrosieris atropurpurea*, *Polytrichum juniperinum*, *Eritrichium villosum*) встречаемостью, отсутствующие или единично встречающиеся в смежных [20–22] регионах. Общее проективное покрытие (ОПП) исследуемых фитоценозов варьирует от 50 до 98%. Основные компоненты, слагающие растительный покров, – это лишайники (40–100%) и травы (15–40%). В сообществах можно выделить 2 яруса: первый – высотой 10–15 см, сложен преимущественно травянистыми растениями, которые растут разреженно, и напочвенный до 5 см высоты, хорошо сформированный в основном лишайниками. Горизонтальная структура представляет собой сочетание куртин из *A. glacialis*, пространство между которыми равномерно заполняют лишайники, *C. arctisibirica* и другие виды. Участки с растительностью перемежаются с каменистыми участками между ними.

Сообщества располагаются в гольцовом поясе, на нагорной террасе, приуроченной к самой верхней части г. Баркова и прилегающих к ней склонах разной экспозиции на высотах 1272–1336 м над у. м. Фитоценозы с *A. glacialis* встречаются в арктической зоне, высокогорьях Урала и Азиатской части Рос-

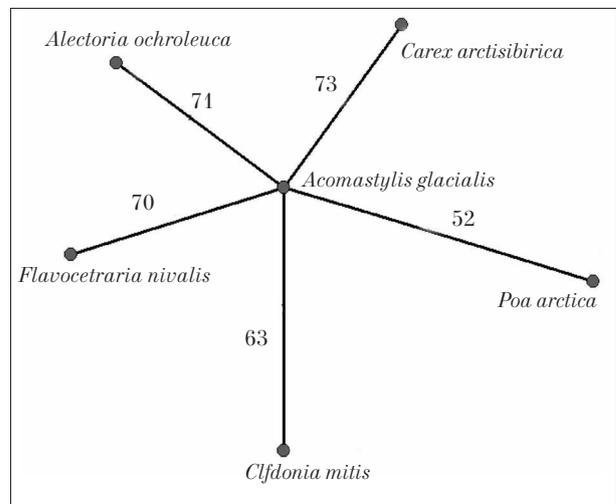


Рис. 1. Показатель сопряжённости видов в сообществах с учётом вклада вида в проективное покрытие
 Fig. 1. Parameter of species association in the communities according to the species share in the projective cover

сии [8, 16–17, 20–22, 24–25, 31] (табл. 1) и на Аляске [4, 6, 23, 26]. Этот вид проявляет себя в сообществах и как ценозообразователь, и как малообильный вид. На западном макросклоне Приполярного и Северного Урала осоково-лишайниковые горные тундры с участием *A. glacialis* отмечены в гольцовом поясе, начиная с 63°30' и севернее [18, данные УНУ «Научный гербарий СУКО ФГБУН Института биологии Коми НЦ УрО РАН»], в том числе и на г. Баркова [1, 31].

Этот вид произрастает совместно с дриадой, либо кассиопеей в арктических районах: на Аляске [4, 23, 26], высокогорьях Сибири, Полярном Урале [16, 20–22, 24, 25]. На Приполярном Урале – обилие дриады в рассматриваемых сообществах минимально, встречаемость её низка [31]. Отличается комплекс доминантов, показатели видовой насыщенности, ОПП (табл. 1) и соотношение компонентов растительного покрова. О региональных различиях свидетельствует и ординация рассматриваемых сообществ (рис. 2) из различных регионов: архипелаг Северная Земля (А – сообщество *Novosiversia glacialis-Polytrichum strictum*) [20]; западный макросклон Приполярного Урала (Б – сообщество *Carex arctisibirica-Acomastylis glacialis – Alectoria ochroleuca*, по данным автора); Таймыро-Североземельская горно-равнинная страна (В – асс. *Bryocaulon divergens-Vacconietum uliginosii* субасс. *Typicum*) [22]; восточный макросклон Полярного Урала (Г – кустарничково-лишайниково-

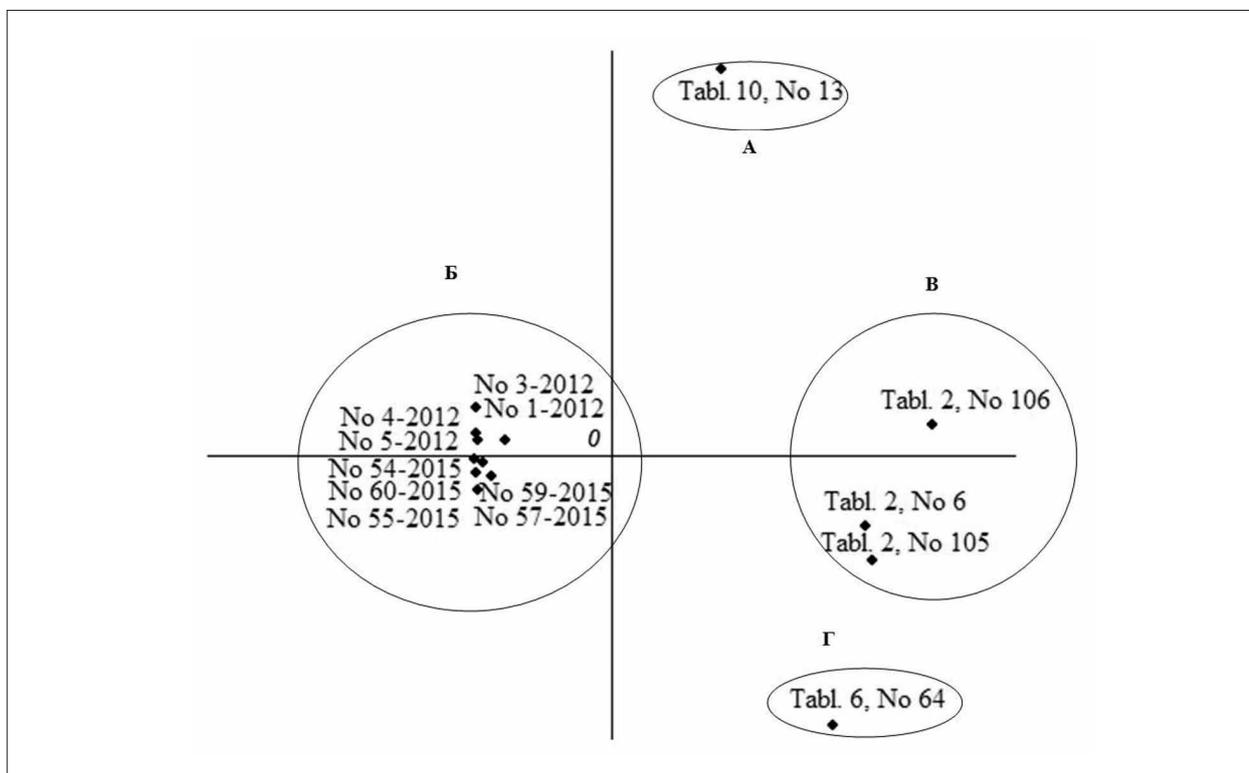


Рис. 2. Ординация сообществ, построенная на основе алгоритма анализа данных NMS (nonmetric multidimensional scaling), реализованный в модуле «GRAPHS»

Примечание: Номера таблиц и описаний на рисунке (табл. № оп. №) даны согласно опубликованным литературным источникам: А – по [20], В – по [22], Г – по [21], Б – по данным автора.

Fig. 2. Ordination of communities made by NMS approach using «GRAPHS»

Note: Table and releves numbers at the figure are given according to the published literature sources: А – by [23], В – by [25], Г – by [24], Б – by author.

моховая тундра) [21]. Активно проявляют себя в исследованных фитоценозах диагностические виды класса *Loiseleurio-Vaccinietae* Egger ex Schubert 1960 и союза *Loiseleurio-Diapension* (Br.-Bl. et al. 1939) Dániels 1982 (*Thamnolia vermicularis*, *Cladonia uncialis*, *Cladonia stellaris*, *Stereocaulon paschale*, *Alectoria ochroleuca*, *Alectoria nigricans*, *Flavocestraria nivalis*). Отнесение данного сообщества к высшим синтаксономическим единицам пока остаётся открытым.

Особенностью изучаемых сообществ является произрастание здесь 21 редкого и нуждающегося в бионадзоре на территории РК таксона: 17 сосудистых растений, одного вида мха и трёх – лишайников [4, 12]. В целом на г. Баркова обнаружено 34 нуждающихся в охране вида цветковых растений. Половина из них растет в сообществах с *A. glacialis*. *R. rosea* включён в Красные книги Республики Коми и Российской Федерации [12]. Четыре таксона сокращают свою численность в РК: эндемик Арктики – *Paraver lapponicum* subsp. *jugoricum*, плейстоценовые перигляциальные реликты, проникшие на Урал из высоко-

горных районов Азии – *Oxygraphis glacialis*, *R. quadrifida*, *R. rosea*. Большая часть редких видов, произрастающих в этих сообществах, имеет низкую численность и ограниченно распространена, либо сведений о состоянии их популяций недостаточно, часть их включена в список бионадзора Республики Коми.

Заклучение

Исследованные сообщества имеют следующие особенности: высокие показатели видового разнообразия и насыщенности по сравнению с другими регионами (Полярный Урал, сибирские арктические и высокогорные районы); преобладание по разнообразию и по покрытию таксонов, отражающих участие видов в формировании растительного покрова сообществ, преобладание споровых растений над сосудистыми; произрастание в них значительного числа редких и нуждающихся в бионадзоре видов сосудистых растений, мохообразных и лишайников, занесённых в Красную Книгу Республики Коми [12]. Полученные нами сведения о составе и структуре

сообществ *Carex arctisibirica* – *Acomastylis glacialis* – *Alectoria ochroleuca* дополняют имеющиеся данные по растительности горных тундр Приполярного Урала и важны для сохранения уникальных экосистем данного региона.

Автор признательна всем коллегам, оказавшим помощь в сборе материала в полевых условиях – Е. Н. Патовой, М. Д. Сивкову, И. В. Новаковской, определении споровых – Г. В. Железновой, Т. Н. Пыстиной, консультациями при написании статьи – Н. В. Матвеевой, А. Б. Новаковскому. Работа выполнена при частичной финансовой поддержке проекта УрО РАН № 18-4-4-14 и бюджетной темы АААА-А16-116021010241-9.

Литература

- Кулюгина Е.Е., Тетерюк Л.В., Тетерюк Б.Ю., Козлова И.А. Флора и редкие виды г. Баркова // Современное состояние и перспективы развития сети ООПТ Европейского Севера и Урала: Матер. докл. Всероссийской научно-практической конференции. Сыктывкар, 2015. С. 208–215.
- Арктическая флора СССР. Вып. IX. Семейства *Drosaceae* – *Leguminosae*, Ч. I Семейства *Drosaceae* – *Rosaceae*. Л.: Наука, 1984. 334 с.
- Spetzman L.A. Vegetation of the Arctic slope of Alaska // US. Geological Survey Professional Paper. 302-B. Washington, DC: US. Government Printing Office. 1959. 58 p.
- Wiggins I.L., Thomas J.H. A flora of the Alaskan Arctic Slope. Toronto: University of Toronto Press, 1962. 425 p.
- The expedition El'gygytgyn lake 2003 (Siberian Arctic) / Eds. M. Melles, P. Minyuk, J. Brigham-Grette, O. Ber. Juschus Polarforsch. Meeresforsch. 2005. No. 505. 139 p.
- Raynolds M.K., Walker D.A., Maier H.A. Plant community-level mapping of arctic Alaska based on the circumpolar arctic vegetation map // Phytocoenologia. 2005. V. 35 No. 4. P. 821–848.
- Telyatnikov M.Yu. Ecological features of cenofloras of subarctic tundras of Siberia // Contemporary Problems of Ecology. 2008. V. 1. No. 1. P. 59–71.
- Safronova I.N., Yurkovskaya T.K., Miklyaeva I.M., Ogureev G.N. Zones and altitudinal zonality types of vegetation of Russia and adjacent territories // Proceedings of the fifth International workshop: CAFF Flora group. Circumboreal Vegetation Mapping Workshop. CAFF Technical Report. 2010. No. 21. P. 52–73.
- Flora of North America [Электронный ресурс] <http://www.efloras.org/> (Дата обращения: 24.01.2018).
- Vascular flora and non-vascular checklist of Alaska [Электронный ресурс] <https://floraofalaska.org/> (Дата обращения: 25.01.2018).
- Annotated checklist of the panarctic flora (PAF): vascular plants [Электронный ресурс] <http://nhm2.uio.no/paf/> (Дата обращения: 26.10.2016).
- Красная книга Республики Коми. Сыктывкар, 2009. 721 с.
- Горчаковский П.Л. Растительность хребта Сабли на Приполярном Урале // Растительность Крайнего Севера СССР и её освоение. М.: Изд-во АН СССР, 1958. Вып. 3. С. 95–127.
- Флоры, лишено- и микобиоты особо охраняемых ландшафтов бассейнов рек Косью и Большая Сыня (Приполярный Урал, национальный парк «Югыд ва») / Отв. ред. С.В. Дёгтева. М.: Товарищество научных изданий КМК, 2016. 483 с.
- Дёгтева С.В., Дубровский Ю.А., Кулюгина Е.Е., Новаковский А.Б. Сравнительный анализ ценофлор горных тундр западного макросклона Северного и Приполярного Урала // Теоретическая и прикладная экология. 2014. № 1. С. 16–21.
- Частухина С.А. Ценофлорная роль *Novosiversia glacialis* (*Rosaceae*) в горных дриадовых куртинных тундрах плато Путорана // Ботанический журнал. 1984. Т. 69. № 3. С. 399–403.
- Chernov Yu.I., Matveyeva N.V. Arctic ecosystems in Russia // Polar and Alpine Tundra. Ecosystems of the world. Amsterdam: Elsevier. 1997. V. 3. P. 361–507.
- Юдин Ю.П. Горные тундры // Производительные силы Коми АССР. М.: Изд-во АН СССР, 1954. Т. 3. Ч. 1. Растительный мир. С. 277–322.
- Биоразнообразие водных и наземных экосистем бассейна реки Кожим (северная часть национального парка «Югыд ва») / Отв. ред. Е.Н. Патова. Сыктывкар, 2010. 192 с.
- Матвеева Н.В. Растительность южной части острова Большевик (архипелаг Северная Земля) // Растительность России. 2006. № 8. С. 3–87.
- Морозова Л.М., Магомедова М.А., Эктова С.Н., Дьяченко А.П., Князев М.С. Растительные покровы и растительные ресурсы Полярного Урала. Екатеринбург: Изд-во Урал. ун-та, 2006. 796 с.
- Телятников М.Ю. Характеристика синтаксонов класса *Loiseleurio-Vaccinieta* северо-восточной части окрестностей оз. Пясино (юго-запад Северо-Сибирской равнины) // Растительный мир Азиатской России. 2010. № 1 (5). С. 33–41.
- Walker M.D., Walker D.A., Auerbach N.A. Plant communities of a tussock tundra landscape in the Brooks Range Foothills, Alaska // Journal of Vegetation Science. 1994. V. 5. No. 6. P. 843–866.
- Чернядьева И.В. Растительность горных тундр северо-запада плато Путорана // Ботанический журнал. 1983. Т. 68. № 6. С. 721–856.
- Куваев В.Б., Кожевникова А.Д., Гудошникова С.В., Журбенко М.П., Нездойминов Э.Л. Растительный покров острова Сибирякова. Опыт комплексного флористического и геоботанического обследования. М., 1994. 138 с.
- Viereck L.A., Dyrness C.T., Batten A.R., Wenzlick K.J. The Alaska vegetation classification. Gen. Tech. Rep. PNW-GTR-286. Portland, OR: U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Pacific Northwest Research Station. 1992. 278 p.
- Westhoff V., van der Maarel E. The Braun-Blanquet approach // Handbook of Vegetation Science. 1973. V. 5. P. 617–726.
- Walker M.D., Daniëls, van der Maarel E. Circumpolar arctic vegetation: introduction and perspectives // J. Veg. Sci. 1994a. V. 5. No. 6. P. 758–764.
- Alaska geobotany center [Электронный ресурс] <http://www.geobotany.uaf.edu/> (Дата обращения: 25.01.2018).

30. Novakovskiy A. Presentation of the module "GRAPHS" for analyzing geobotanical data // Earth Science and Engineering. 2014. V. 4. P. 88–93.

31. Кулюгина Е.Е. Сообщества с *Acomastylis glacialis* (Приполярный Урал, г. Баркова) // Современные фундаментальные проблемы классификации растительности: Тезисы Междунар. науч. конф. Ялта. 2016. С. 66–67.

References

1. Kulyugina E.E., Teteryuk L.V., Teteryuk B.Yu., Kozlova I.A. Flora and rare species of the Barkova Mountain // Current status and prospects for the development of the network of specially protected natural territories at the European North and the Urals: Materialy dokladov Vserossiyskoy nauchno-prakticheskoy konferentsii. Syktyvkar, 2015. P. 208–215 (in Russian).

2. Arctic flora of the USSR. Vol. IX. Families *Drosaceae* – *Leguminosae*. Part I Families *Drosaceae* – *Rosaceae*. Leningrad: Nauka, 1984. 334 p. (in Russian).

3. Spetzman L.A. Vegetation of the Arctic slope of Alaska // US. Geological Survey Professional Paper. 302-B. Washington, DC: US. Government Printing Office. 1959. 58 p.

4. Wiggins I.L., Thomas J.H. A flora of the Alaskan Arctic Slope. Toronto: University of Toronto Press, 1962. 425 p.

5. The expedition El'gygytyn lake 2003 (Siberian Arctic) / Eds. M. Melles, P. Minyuk, J. Brigham-Grette, O. Ber. Juschus Polarforsch. Meeresforsch. 2005. No. 505. 139 p.

6. Reynolds M.K., Walker D.A., Maier H.A. Plant community-level mapping of arctic Alaska based on the circumpolar arctic vegetation map // Phytocoenologia. 2005. V. 35 No. 4. P. 821–848.

7. Telyatnikov M.Yu. Ecological features of cenofloras of subarctic tundras of Siberia // Contemporary Problems of Ecology. 2008. V. 1. No. 1. P. 59–71.

8. Safronova I.N., Yurkovskaya T.K., Miklyaeva I.M., Ogureev G.N. Zones and altitudinal zonality types of vegetation of Russia and adjacent territories // Proceedings of the fifth International workshop: CAFF Flora group. Circumboreal Vegetation Mapping Workshop. CAFF Technical Report. 2010. No. 21. P. 52–73.

9. Flora of North America [Internet resource] <http://www.efloras.org/> (Accessed: 24.01.2018).

10. Vascular flora and non-vascular checklist of Alaska [Internet resource] <https://floraofalaska.org/> (Accessed: 25.01.2018).

11. Annotated checklist of the panarctic flora (PAF): vascular plants [Internet resource] <http://nhm2.uio.no/paf/> (Accessed: 26.10.2016).

12. The Red Book of the Republic of Komi. Syktyvkar, 2009. 721 p. (in Russian)

13. Gorchakovskiy P.L. Vegetation of the Sabre Ridge in the Subpolar Urals // Vegetation of the Far North of the USSR and its mastering. Moskva: Izd-vo AN SSSR, 1958. V. 3. P. 95–127 (in Russian).

14. Florae, lihen and fungi species lists of the protected landscapes in the Kosyu and Bolshaya Synya river basins (Subpolar Urals, the National Park "Yugyd Va") / Ed. S.V. Degteva. Moskva: KMK, 2016. 483 p. (in Russian).

15. Degteva S.V., Kulugina E.E., Dubrovskiy Yu.A., Novakovskiy A.B. Comparative analysis of cenofloras of moun-

tain tundra communities in the west macroslope of Northern and Subpolar Ural // Teoreticheskaya i prikladnaya ekologiya. 2014. No. 1. P. 16–21 (in Russian).

16. Chastukhina S.A. Coenotical role of *Novosiversia glacialis* (Rosaceae) in the mountain dryas tundra of the Putorana plateau // Botnical Journal. 1984. V. 69. No. 3. P. 399–403 (in Russian).

17. Chernov Yu.I., Matveyeva N.V. Arctic ecosystems in Russia // Polar and Alpine Tundra. Ecosystems of the world. Amsterdam: Elsevier. 1997. V. 3. P. 361–507.

18. Yudin Y.P. Mountain tundra communities // Productive power of the Komi ASSR. Moskva: Izdatelstvo AN SSSR, 1954. V. 3. Part 1. P. 277–322 (in Russian).

19. Biodiversity of terrestrial and water ecosystems of the Kozhym River basin (northern part of the «Yugyd Va» national park) / Ed. E.N. Patova. Syktyvkar, 2010. 192 p. (in Russian).

20. Matveeva N.V. Vegetation of southern Bolshevik Island (Severnaya Zemlya archipelago) // Vegetation of Russia. 2006. No. 8. P. 3–87 (in Russian).

21. Morozova L.M., Magomedova M.A., Ektova S.N., Dyachenko A.P., Knyazev M.S. Vegetation cover and plant resources of the Polar Urals. Ekaterinburg: Izdatelstvo Uralskogo universiteta, 2006. 796 p. (in Russian).

22. Telyatnikov M.Y. Characteristic of *Loiseleurio-Vaccinietaea* syntaxons in the north-eastern vicinities of the lake Pyasino (south-west of the North Siberian Plain) // Rastitelnyy mir Aziatskoy Rossii. 2010. No. 1 (5). P. 33–41 (in Russian).

23. Walker M.D., Walker D.A., Auerbach N.A. Plant communities of a tussock tundra landscape in the Brooks Range Foothills, Alaska // Journal of Vegetation Science. 1994. V. 5. No. 6. P. 843–866.

24. Chernyadyeva I.V. Vegetation of mountain tundra in the north-west of the Putorana plateau // Botanicheskiy zhurnal. 1983. V. 68. No. 6. P. 721–856 (in Russian).

25. Kuvaev V.B., Kozhevnikova A.D., Gudoshnikova S.V., Jurbenko M.P., Nezdoyminy E.L. Vegetation cover of Sibiryakova Island. Experience of complex floristic and geobotanical survey. Moskva, 1994. 138 p. (in Russian).

26. Viereck L.A., Dyrness C.T., Batten A.R., Wenzlick K.J. The Alaska vegetation classification. Gen. Tech. Rep. PNW-GTR-286. Portland, OR: U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Pacific Northwest Research Station. 1992. 278 p.

27. Westhoff V., van der Maarel E. The Braun-Blanquet approach // Handbook of Vegetation Science. 1973. V. 5. P. 617–726.

28. Walker M.D., Dani ls, van der Maarel E. Circumpolar arctic vegetation: introduction and perspectives // J. Veg. Sci. 1994a. V. 5. No. 6. P. 758–764.

29. Alaska geobotany center [Internet resource] <http://www.geobotany.uaf.edu/> (Accessed: 25.01.2018).

30. Novakovskiy A. Presentation of the module "GRAPHS" for analyzing geobotanical data // Earth Science and Engineering. 2014. V. 4. P. 88–93.

31. Kulyugina E.E. Communities with *Acomastylis glacialis* (Subpolar Urals, the Barkova Mountain) // Modern fundamental problems of classification of vegetation: Tezisy mezhdunarodnoy nauchnoy konferentsii. Yalta, 2016. P. 66–67 (in Russian).

**Сообщества актиномицетов в бурозёмах лесных экосистем
с различным типом климата**

© 2018. И. Г. Широких^{1,2,3}, д. б. н., профессор, в. н. с.,
Я. И. Назарова³, м. н. с., А. А. Широких^{1,3}, д. б. н., профессор, в. н. с.,
Т. Я. Ашихмина^{1,2}, д. т. н., профессор, зав. кафедрой, зав. лабораторией,

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

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

³ Федеральный аграрный научный центр Северо-Востока им. Н. В. Рудницкого,
610007, Россия, г. Киров, ул. Ленина, 166а,
e-mail: irgenal@mail.ru

В связи с наблюдаемыми в настоящее время локальными и глобальными изменениями климата усиливается интерес к изучению роли экологических факторов в географическом распространении микроорганизмов. Сопоставление данных об актиномицетных комплексах сходных по генезису и типу почв, сформированных в различных климатических условиях, может дать представление о том, как климатические изменения скажутся на сохранении структуры комплексов и разнообразии почвенных микроорганизмов. С использованием критериев количественного синэкологического анализа охарактеризована таксономическая структура комплексов актиномицетов в бурозёмах, сформированных в условиях средиземноморского, умеренного муссонного и умеренного континентального климата. Показано, что в бурых лесных почвах, различающихся по своему географическому положению и биоклиматическим условиям, доминируют по частоте встречаемости (93–100%) и относительному обилию (33–90%) стрептомицеты. Видовой состав рода *Streptomyces* изменялся в исследованных бурозёмах в зависимости от типа климата. Сходство между комплексами стрептомицетов в бурых лесных почвах, пространственно удалённых в меридиональном направлении выше ($K_s = 52\%$), чем между стрептомицетными комплексами бурозёмов, разоблённых в широтном направлении ($K_s = 9–10\%$). Полученные результаты расширяют представление о роли географических и экологических факторов в распространении мицелиальных прокариот, представляют интерес в связи с наблюдаемыми в настоящее время климатическими изменениями.

Ключевые слова: почвенные актиномицеты, *Streptomyces*, структура комплекса, географическое распространение, климатические условия

**Communities of actinomycetes in brown soils
of forest ecosystems with different climate**

I. G. Shirokikh^{1,2,3}, Ya. I. Nazarova³, A. A. Shirokikh^{1,3}, T. Ya. Ashikhmina^{1,2},

¹Vyatsky State University,

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

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

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

³ Federal agricultural research center of North-East named after N.V. Rudnitsky,

166a, Lenina St., Kirov, Russia, 610007,

e-mail: irgenal@mail.ru

The interest in studying the role of environmental factors in the geographical distribution of microorganisms is amplified by the currently observed local and global climate changes. Given the metabolic diversity and the contribution of actinomycetes in natural suppressive conditions of soils, it is important to determine to what extent climate change is a threat to the preservation of the structure and diversity of their complexes. In part, this idea can be formed by matching data about actinomycetic complexes of similar genesis and type of soils formed under different climatic conditions. It is investigated the taxonomic structure and species composition of actinomycete complexes in the three brown soils formed in a Mediterranean, temperate monsoon and temperate continental climate. The structure of complexes was characterized in terms of quantitative synecological analysis. It is shown that in brown forest soils with different geographical location and bioclimatic conditions *Streptomyces* dominate by frequency of occurrence (93–100%) and relative

abundance (33–90%). The similarities between the complexes of streptomycetes in brown forest soils, spatial remote in the meridional direction is higher (the Sorensen similarity index $K_s = 52\%$) than among streptomycete complexes of brown, separated in the latitudinal direction ($K_s = 9–10\%$). Typical common species in brown forest soils include representatives of the genus *Micromonospora*. Oligosporic actinomycetes in the complexes of brown forest soils on the base of frequency of occurrence occupy the positions of both typical rare and typical frequent species, depending on the site of sampling. Species of the genera *Streptosporangium* and *Streptovercillium* are classified in the complex of brown forest soils as random. These results extend the idea of the role of geographical and ecological factors in the distribution of mycelium prokaryotes, so they are of interest in connection with climate change.

Keywords: soil actinomycetes, *Streptomeces*, structure of complex, geographical distribution, climatic conditions.

Географический космополитизм микроорганизмов породил представление о том, что состав почвенных микробных сообществ определяется, в первую очередь, локальными экологическими условиями, а не географическими координатами как таковыми. Вместе с тем, видовая приуроченность микроорганизмов к определённым местообитаниям опосредованно связана с географическим положением через климатические, литологические, орографические и другие условия среды [1].

Интерес к изучению роли экологических факторов в географическом распространении микроорганизмов усиливается в связи с наблюдаемыми в настоящее время локальными и глобальными изменениями климата [2]. В ряде регионов отмечают сокращение биологического разнообразия, изменение ареалов обитания животных и границ растительных зон [3]. Оценка изменчивости структуры и разнообразия микробных сообществ в условиях локальных климатических изменений только начинается [4]. В связи с высокой практической значимостью, в первую очередь, оценивают влияние климатических изменений на микроорганизмы, способные оказывать влияние на эпидемиологическую [5] и фитосанитарную [6, 7] ситуации.

Одной из интереснейших в биотехнологическом отношении групп почвенных микроорганизмов, которые всё шире находят применение в различных отраслях современной экономики, являются актиномицеты – спорообразующие, грамположительные бактерии, способные к формированию ветвящегося мицелия и обладающие обширным биосинтетическим потенциалом [8]. Среди актиномицетов обнаружены продуценты разнообразных вторичных метаболитов: антибиотиков, противоопухолевых соединений, витаминов, экзогидролаз, фитогормонов и т. д. [9, 10]. В природе актиномицеты выступают в роли природных регуляторов микробных сообществ [11], благодаря антибиозису могут ограничивать в почвах численность фитопатогенов, обуславливая естественные супрессивные свойства почв.

С широким биосинтетическим потенциалом актиномицетов связан интерес к изучению закономерностей их распространения в природе. Когда в почвенной микробиологии стали широко использоваться количественные синэкологические методы, это позволило разработать систему показателей структуры микробных сообществ в масштабе целых биогеоценозов. Таксономическая структура комплексов актиномицетов подробно исследована в почвах основных биоклиматических зон, выявлены особенности вертикальной стратификации комплексов в основных типах биогеоценозов [12]. При этом в качестве основного был использован классический метод посева на плотные среды с модификациями, позволяющими проводить дифференцированный учёт выросших колоний. В достаточно узких модельных группах микроорганизмов, к числу которых относят и актиномицеты, метод посева пригоден для определения относительного обилия видов (таксонов) и количественных оценок разнообразия, при условии строгого статистического подхода [13].

Учитывая метаболическое разнообразие и вклад актиномицетов в естественную супрессивность почв, злободневным является выяснение того, в какой мере климатические изменения представляют угрозу для сохранения структуры и разнообразия их комплексов. Отчасти такое представление можно составить путём сопоставления данных об актиномицетных комплексах сходных по генезису и типу почв, сформированных в различных климатических условиях.

Наиболее распространёнными в мире являются бурые лесные почвы или бурозёмы (Cambisols, согласно мировой коррелятивной базе почвенных ресурсов WRB). Их географический ареал на Почвенной карте мира простирается от бореального пояса до тропического [14]. Леса, под пологом которых формируются бурозёмы, разнообразны по составу (широколиственные, хвойно-широколиственные и хвойные). Вне зависимости от биоклиматической зоны, общей

особенностью бурозёмов является богатый зольными элементами опад с высоким содержанием кальция, магния и др. Бурые лесные почвы содержат 5–10% гумуса, имеют бурую окраску, обусловленную накоплением во всех горизонтах глинистых минералов и оксидов железа, обычно слабокислые, обладают хорошей структурностью [15].

Целью нашей работы явилось изучение структуры комплексов актиномицетов в бурозёмах лесных экосистем внутриконтинентального умеренного, средиземноморского и умеренного муссонного климата.

Материалы и методы

Объектами исследования служили бурозёмы, сформированные в трёх лесных экосистемах географически отдалённых районов Евразии (рис. 1). Образцы отбирали на участках, площадью 100 кв. м каждый, с выделением подстилки и верхнего почвенного слоя (до глубины 10–12 см).

Первый участок представлял собой лесной массив сосны турецкой (*Pinus brutia* var. *pendulifolia*) вблизи п. Ичмелер (36°48'4" с. ш., 28°13'54" в. д.), расположенного в провинции Мугла на юго-западе Турции. Климат средиземноморский, с ярко выраженным дефицитом влаги в летний период и относительно мягкой и влажной зимой. Мощность подстилки изменяется в пределах от 0,5 до 3 см. Подстилка рыхлая, слаборазложившаяся, в ее составе преобладает хвоя. Реакция почвенного раствора слабокислая ($pH_{KCl} = 5,0-5,5$), содержание $C_{орг.}$ составляет 7,2%.

Второй участок находился в Национальном лесном парке Джингуетан, расположенном на северо-востоке Китая (провинция Цзилинь), в 18 км от центра г. Чанчунь (43°41'23" с. ш., 125°24'11" в. д.), под кроной кедра корейского (*Pinus koraiensis*). Главные климатические особенности Манчжурии: жаркое и богатое атмосферными осадками лето и холодная малоснежная зима (муссонный тип климата). Мощность подстилки изменяется в пределах от 3 до 5 см. Реакция почвенного раствора слабокислая ($pH_{KCl} = 4,8-5,5$), содержание $C_{орг.}$ равно 5,6–8,4%.

Третий участок находился в ГПУ «Национальный парк «Беловежская пуща», вблизи д. Каменюки (52°56'98" с. ш.; 23°80'31" в. д.), Беларусь. Образцы были отобраны на территории выдела 77В/80Б смешанного леса, представленного дубравой грабово-кисличной. Климат континентальный умеренный. Зима мягкая и короткая, лето длинное и умеренно тёплое. Мощность подстилки изменяется в пределах от 3 до 4,5 см. Реакция почвенного раствора слабокислая ($pH_{KCl} = 4,8-5,1$), содержание $C_{орг.} = 6,2\%$.

Отбор образцов проводили стандартным методом, анализировали в каждом случае по два усреднённых образца, составленных объединением пяти индивидуальных проб, массой не менее 100 г.

Комплекс актиномицетов выявляли с использованием селективного приёма (прогревание при 70 °С в течение 4 час) при посевах разведений почвенных суспензий. На среде с пропионатом натрия характеризовали родовую структуру комплекса, на казеин-

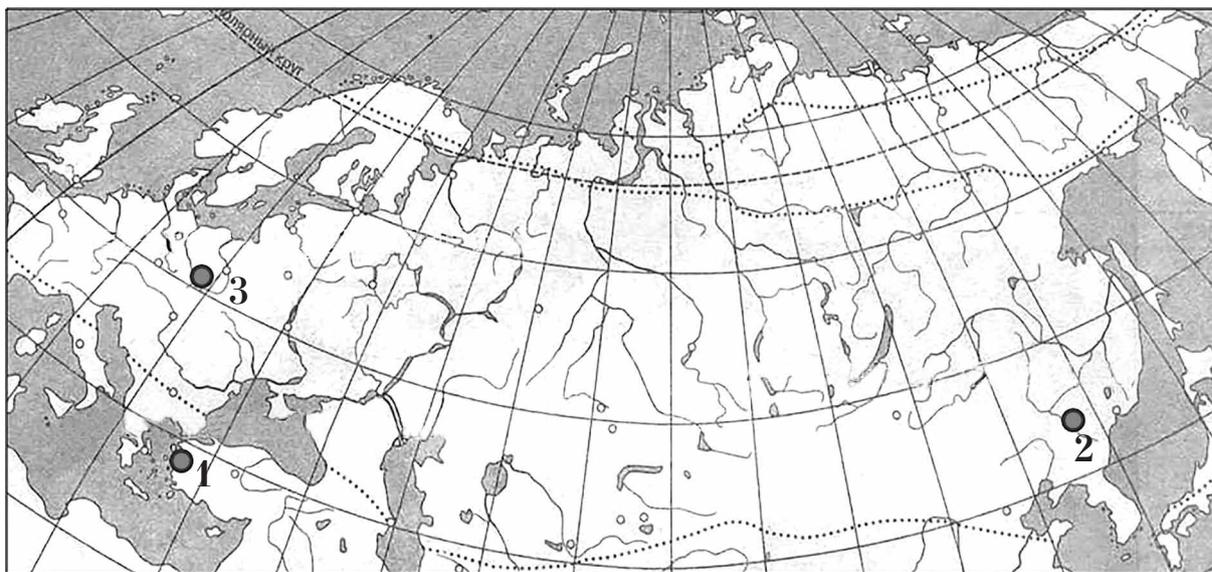


Рис. 1. Местоположение участков отбора образцов бурых лесных почв на карте Евразии
Fig. 1. Location of a parcel of samples of brown forest soils on the map of Eurasia

глицериновом агаре – видовую структуру стрептомицетов. Чашки с посевами культивировали при 28 °С в течение 10–14 сут. Колонии разных морфотипов учитывали дифференцированно и отсеивали на косой агар. После процедуры очистки культуры актиномицетов идентифицировали, используя определители [16, 17].

Статистическую обработку данных проводили стандартными методами с использованием программы Excel 7. Для оценки достоверности различий частоты встречаемости в изучаемых биотопах применяли статистическую обработку методом сравнения долей, а для установления различий в долевого участия родов – метод сравнения средних арифметических двух независимых совокупностей, имеющих разные дисперсии [18].

Результаты и их обсуждение

Сформированные в различных климатических условиях комплексы актиномицетов бурых лесных почв характеризовались близкими значениями численности, которая варьировала от десятков до сотен тысяч колониеобразующих единиц (КОЕ) в 1 г субстрата (табл.). Основным местом сосредоточения актиномицетов в лесных экосистемах умеренных широт («Беловежье» и «Манчжурия») выступили подстилки; верхние горизонты почв по численности уступали им на порядок. Преимущественная локализация актиномицетов в подстилках объясняется присущей им экологической стратегией: значительное увеличение численности и доминирование актиномицетов можно наблюдать в ситуациях, когда складываются условия для использования труднодоступных источников питания. Аналогичные результаты отмечались и ранее – в лесных биоценозах умеренной зоны европейской территории континента [19].

В отличие от бурозёмов умеренного пояса «Ичмелер» характеризовался более высокой концентрацией актиномицетов не в подстилке, а в верхнем почвенном горизонте. Это объясняется характерной особенностью средиземноморского климата – ярко выраженным летним дефицитом влаги, в результате чего подстилка в период проведения исследований находилась в воздушно-сухом состоянии, тогда как в почвенных горизонтах некоторый запас влаги еще сохранялся.

В более широких пределах, чем численность, изменялись в зависимости от климатических условий и вида исследованного

субстрата (почвы или подстилки) показатели долевого участия актиномицетов (от 0 до 70%) в прокариотных комплексах бурых лесных почв. Различия в степени насыщения бактериальных сообществ мицелиальными прокариотами очевидно связаны с особенностями биополимерного комплекса растительного опада в географически отдалённых лесных экосистемах. Различия могут касаться как относительного содержания в опаде полисахаридов (целлюлозы, гемицеллюлозы) и лигнина, так и элементного состава, структуры макромолекул лигнина у разных растений. Например, лигнин травянистых растений содержит кониферилловый и кумаровый спирты, для древесины лиственных пород более характерными являются кониферилловый и синаповый спирты, тогда как для лигнина хвойных – кониферилловый спирт [20]. В зависимости от особенностей биополимерного комплекса изменяется и степень вовлечённости актиномицетов в конвейерную переработку растительного опада в данной экосистеме.

Несмотря на пространственную разобщённость сравниваемых бурозёмов, в составе всех актиномицетных комплексов обнаружены представители родов *Streptomyces*, *Micromonospora* и олигоспоровые формы. Наряду с ними комплексы бурых лесных почв «Беловежья» и «Манчжурии» включали в качестве минорных компонентов представителей родов *Streptosporangium* (0–9%) и *Streptoverticillium* (0–6,5%), отсутствовавшие в комплексе «Ичмелера». В большинстве исследованных субстратов долевого участие в комплексах стрептомицетов (50–90%) многократно превосходило вклад представителей других родов актиномицетов. Исключение составил подстилочный комплекс «Ичмелера», в котором, при общей малочисленности мицелиальных прокариот ($2,5 \cdot 10^4$ КОЕ/г) доминировали не стрептомицеты, а микромоноспоры (66,7%). Комплексы бурых лесных почв значительно различались между собой по относительному обилию олигоспоровых видов, которое варьировало от 0–8% в бурозёме «Манчжурии» до 11,5–67,0% в бурой лесной почве «Беловежья». Долевого участие олигоспор в почвенном комплексе «Ичмелера» составило около 10%, а в подстилке олигоспоровые виды не обнаружены.

В зависимости от типа климата в исследованных бурозёмах изменялся видовой состав доминирующего рода *Streptomyces*. В бурой лесной почве «Ичмелера» стрептомицетный комплекс был представлен видами пяти серий

Сравнительная характеристика комплексов актиномицетов в бурых лесных почвах различного географического положения
 Comparative characteristics of the complexes of actinomycetes in brown forest soils different locations

Показатель / Parameter	Модельные участки/субстраты Model areas/substrates					
	«Ичмелер» “Ichmeler”		«Беловежье» “Belovezhye”		«Манчжурия» “Manchzhuriya”	
	подстилка litter	почва soil	подстилка litter	почва soil	подстилка litter	почва soil
Общая численность прокариот, вырастающих на КА, тыс. КОЕ/г The total number of prokaryotes growing on the САВ, thousand CFU/g	258±112	380±269	1120±192	304±71	1771±680	443±137
Доля актиномицетов в прокариотном комплексе, % The proportion of actinomycetes in the prokaryotic complex, %	1,9-4,8	12,8-51,6	28-53	0-9	26-44	66-70
Количество секций и серий рода <i>Streptomyces</i> The number of sections and series of the genus <i>Streptomyces</i>	1	5	5	4	8	3
Численность актиномицетов, вырастающих на среде с пропионатом натрия, тыс. КОЕ/г The number of actinomycetes, growing on the medium with sodium propionate, thousand CFU/g	25±14	167±75	578±134	21,8±0,9	423±29	350±65
Количество родов, выделяемых на среде с пропионатом натрия The number of genera distinguished on the medium with sodium propionate	2	3	5	3	5	5
Относительное обилие в комплексе представителей родов, % The relative abundance in the complex of the genera, %	33,3	73,0-7,8	55-85,3	50-72,6	61-90	76-77
<i>Streptomyces</i>	66,7	16,1-16,6	11-20,7	8,2-38,5	2-32	6-23
<i>Micromonospora</i>	0	10,1-10,4	3,7-2,7	1,5-6,0	2-6	0-8
олигоспоровые формы / oligospergia forms	0	0	0-3,5	0	0-2	0-9
<i>Streptosporangium</i>	0	0	3,2-6,5	0	0-0,7	0-1
<i>Streptoverticillium</i>	0	0				

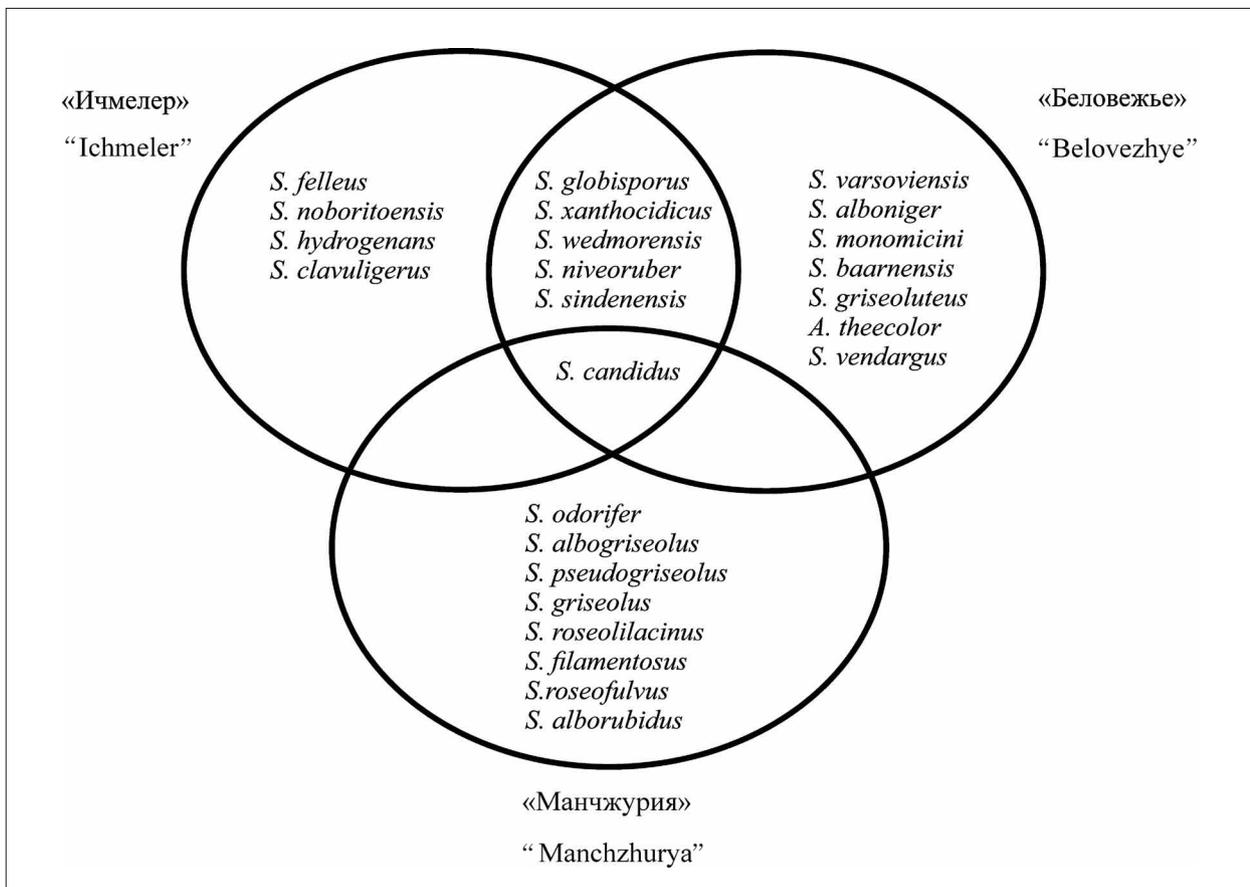


Рис. 2. Сходство и различие видового состава стрептомицетов в бурых лесных почвах экосистем с различным типом климата
Fig. 2. The similarities and differences in the species composition of the streptomycetes in brown forest soil ecosystems with different type of climate

из трёх секций. Доминировали в комплексе виды секции Helvolo-Flavus Helvolus (50%). Особенно часто (30% всех изолятов) встречался вид *S. felleus*. При анализе видовой представленности стрептомицетов в бурозёме «Манчжурии» из почвы и подстилки были изолированы виды, отнесённые к пяти сериям из четырёх секций [16]. Треть всех изолятов представляла секцию Roseus, четверть была отнесена к серии Cinereus Achromogenes. Стрептомицетный комплекс бурой лесной почвы «Беловежья» включал виды семи серий из четырёх секций. Наиболее часто встречались виды *S. candidus* (20%), *S. wedmorensis* и *S. globisporus* (по 17%).

Таким образом, комплексы стрептомицетов бурых лесных почв, сформированных в различных климатических условиях, отличались специфичностью видового состава (рис. 2). Если в бурозёмах «Ичмелера» и «Беловежья» выявлено по шесть общих для того и другого комплекса видов, то в бурой лесной почве «Манчжурии» выявлен лишь

один вид *S. candidus*, встречающийся также в условиях Средиземноморья и Беловежской пуши. Расчёт показателей сходства Сёренсена позволил заключить, что по видовому составу комплексы стрептомицетов в бурых лесных почвах, сформированных в условиях средиземноморского и умеренного континентального климата, ближе ($K_s = 52\%$), чем их сходство с комплексом бурозёма, подверженного влиянию муссонного климата ($K_s = 9-10\%$).

Заключение

В результате выполненных исследований охарактеризована в сравнительном аспекте структура актиномицетных комплексов в бурозёмах лесных экосистем, сформированных в условиях средиземноморского («Ичмелер»), умеренного муссонного («Манчжурия») и умеренного континентального («Беловежье») климата. Независимо от климатических условий, доминировали в исследованных почвах, по частоте встречаемости и относительному

обилию, представители рода *Streptomyces*. Видовой состав стрептомицетных комплексов в каждой из исследованных почв отличался специфичностью, связанной, по-видимому, с особенностями биополимерного комплекса растительного опада, в трансформации которого мицелиальные прокариоты принимают активное участие. С использованием индексов Сёренсена показано, что различие между комплексами стрептомицетов в бурозёмах, пространственно удалённых в меридиональном направлении, менее значительно ($K_s = 52\%$), чем между стрептомицетными комплексами бурых лесных почв, разобщённых в широтном направлении ($K_s = 9-10\%$).

К типичным частым видам в бурых лесных почвах отнесены представители рода *Microtopospora*, которые, в зависимости от конкретных экологических условий, могут переходить в разряд доминантов («Ичмелер», подстилка). Олигоспоровые актиномицеты, на основании частоты встречаемости, в комплексах бурозёмов занимают позиции как типичных редких («Манчжурия»), так и типичных частых («Ичмелер») видов, при этом относительная доля в комплексе для олигоспор практически не превышает 10%.

Виды родов *Streptosporangium* и *Streptovorticillium*, отнесённые в комплексе бурых лесных почв к разряду случайных, были отмечены только в лесных экосистемах умеренного пояса, как с муссонным, так и с континентальным типом климата, но не встречались в «Ичмелере».

Выявленные количественные различия и особенности структуры комплексов актиномицетов в почвах одного генетического типа, но разобщённых в географическом отношении, свидетельствуют о значительном вкладе климатического фактора в формирование почвенной актинобиоты и могут иметь прогностическое значение в связи с глобальными и локальными тенденциями изменения климата.

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. Заварзин Г.А. Микробная биогеография // Журнал общей биологии. 1994. Т. 55. № 1. С. 5–12.
2. Climate Change 2013: The Physical Science Basis IPCC Working Group I Contribution to AR5 [Электрон-

ный ресурс] <http://www.climatechange2013.org/> (Дата обращения: 08.02.2018).

3. Тальских В.Н., Митропольский О.В. Реакция биологического разнообразия на изменение климата и меры адаптации // Последствия изменения климата в Узбекистане, меры адаптации. Бюл. № 7. Ташкент: НИГМИ. 2008. С. 62–67.

4. Pritchard S.G. Soil organisms and global climate change // Plant Pathol. 2011. V. 60. No. 1. P. 82–99.

5. Панин А.Л., Белов А.Б., Краева Л.А., Болехан В.Н., Владимирова Н.Г., Гончаров А.Е., Власов Д.Ю., Тешебаев Ш.Б., Шаров А.Н., Толстиков А.В. Микробиологический мониторинг Антарктиды как предиктор рисков изменения климата Земли // Труды БГУ. 2014. Т. 9. Ч. 2. С. 68–81.

6. Левитин М.М. Изменение климата и прогноз развития болезней растений // Микология и фитопатология. 2012. Т. 46. Вып. 1. С. 14–19.

7. Левитин М.М. Микроорганизмы в условиях глобального изменения климата // Сельскохозяйственная биология. 2015. № 5. С. 641–647.

8. Euzéby J.P. List of prokaryotic names with standing in nomenclature. 2009. [Электронный ресурс] <http://www.bacterio.net> (Дата обращения: 08.02.2018).

9. Demain A.L. Small bugs, big business: The economic power of the microbe // Biotechnology Advances. 2000. V. 18. No. 6. P. 499–514.

10. Kekuda T.R.P., Shobha K.S., Onkarappa R. Fascinating diversity and potent biological activities of Actinomycete metabolites // Journal of Pharmacy Research. 2010. V. 3. No. 2. P. 250–256.

11. Strohl W.R. Antimicrobials / Microbial diversity and bioprocessing / Ed. A.T. Bull. American Society for Microbiology, Washington DC. 2004. P. 336–355.

12. Звягинцев Д.Г., Зенова Г.М. Экология актиномицетов. М.: ГЕОС, 2001. 257 с.

13. Чернов И.Ю. Дрожжи в природе. М.: Товарищество научных изданий КМК, 2013. 336 с.

14. Harmonized World Soil Database (version 1.1). Rome, Italy: FAO; Laxenburg, Austria: IASA, 2009. 38 p.

15. Исаченко А.Г., Шляпников А.А. Природа мира: Ландшафты. М.: Мысль, 1989. 504 с.

16. Гаузе Г.Ф., Преображенская Т.П., Свешникова М.А., Терехова Л.П., Максимова Т.С. Определитель актиномицетов. Роды *Streptomyces*, *Streptovorticillium*, *Chainia*. М.: Наука, 1983. 248 с.

17. Определитель бактерий Берджи. В 2-х т. / Под ред. Дж. Хоулта, Н. Крига, П. Снита, Дж. Стейли, С.С. Уилльямса. М.: Мир, 1997. Т. 2. 800 с.

18. Дмитриев Е.А. Математическая статистика в почвоведении. М.: МГУ, 1972. 291 с.

19. Зенова Г.М., Грачева Т.А., Манучарова Н.А., Звягинцев Д.Г. Актиномицетные сообщества лесных экосистем // Почвоведение. 1996. № 11. С. 1347–1351.

20. Терехова В.А., Семенова Т.А. Структура сообществ микромицетов и их синэкологические взаимодействия с базидиальными грибами в ходе разложения растительных остатков // *Микробиология*. 2005. Т. 74. № 1. С. 104–110.

References

1. Zavarzin G.A. Microbial biogeography // *Zhurnal obshchey biologii*. 1994. V. 55. No. 1. P. 5–12 (in Russian).

2. Climate Change 2013: The Physical Science Basis IPCC Working Group I Contribution to AR5 [Internet resource] <http://www.climatechange2013.org/> (Accessed: 08.02.2018).

3. Talskikh V.N., Mitropolskiy O.V. Responses of biological diversity to climate change and adaptation measures // *Effects of climate change in Uzbekistan, measures of adaptation*. Byul. No. 7. Tashkent: NIGMI. 2008. P. 62–67 (in Russian).

4. Pritchard S.G. Soil organisms and global climate change // *Plant Pathol.* 2011. V. 60. No. 1. P. 82–99 (in Russian).

5. Panin A.L., Belov A.B., Krayeva L.A., Bolekhan V.N., Vladimirova N.G., Goncharov A.E., Vlasov D.Yu., Teshebayev Sh.B., Sharov A.N., Tolstikov A.V. Microbiological monitoring of Antarctica as a predictor of the risk of climate change the Earth // *Trudy BGU*. 2014. V. 9. Ch. 2. P. 68–81 (in Russian).

6. Levitin M.M. Climate change and the prediction of the development of plant diseases // *Mikologiya i fitopatologiya*. 2012. V. 46. No. 1. P. 14–19 (in Russian).

7. Levitin M.M. Climate change and the forecast of development of plant diseases // *Selskokhozyaystvennaya biologiya*. 2015. No. 5. P. 641–647 (in Russian).

8. Euzebey J.P. List of Prokaryotic [Internet resource] <http://www.bacterio.net> (Accessed: 08.02.2018).

9. Demain A.L. Small bugs, big business: The economic power of the microbe // *Biotechnology Advances*. 2000. V. 18. No. 6. P. 499–514.

10. Kekuda T.R.P., Shobha K.S., Onkarappa R. Fascinating diversity and potent biological activities of Actinomycete metabolites // *Journal of Pharmacy Research*. 2010. V. 3. No. 2. P. 250–256.

11. Strohl W.R. Antimicrobials / Microbial diversity and bioprocessing / Ed. A.T. Bull. American Society for Microbiology, Washington DC. 2004. P. 336–355.

12. Zvyagintsev D.G., Zenova G.M. Ecology of actinomycetes. Moskva: GEOS, 2001. 257 p. (in Russian).

13. Chernov I.Yu. Yeast in nature. Moskva: Tovarishestvo nauchnykh izdaniy KMK, 2013. 336 p. (in Russian).

14. Harmonized World Soil Database (version 1.1). Rome, Italy: FAO; Laxenburg, Austria: IIASA, 2009. 38 p.

15. Isachenko A.G., Shlyapnikov A.A. The nature of the world: Landscapes. Moskva: Mysl, 1989. 504 p. (in Russian).

16. Gauze G.F., Preobrazhenskaya T.P., Sveshnikova M.A., Terekhova L.P., Maksimova T.S. Manual of actinomycetes. Genus *Sreptomycetes*, *Streptovercillium*, *Chainia*. Moskva: Nauka, 1983. 248 p. (in Russian).

17. The determinant of bacteria Berdzhi. In 2 v. / Eds. Dzh. Khoul't, N. Krig, P. Snit, Dzh. Steyli, S.S. Uillyams. Moskva: Mir, 1997. V. 2. 800 p. (in Russian).

18. Dmitriyev E.A. Mathematical statistics in soil science. Moskva: MGU, 1972. 291 p. (in Russian).

19. Zenova G.M., Gracheva T.A., Manucharova N.A., Zvyagintsev D.G. Actinomycete community forest ecosystems // *Pochvovedeniye*. 1996. No. 11. P. 1347–1351 (in Russian).

20. Terekhova V.A., Semenova T.A. Structure of communities of micromycetes and their synecological interaction with basidiomycetous fungi during decomposition of plant residues // *Mikrobiologiya*. 2005. V. 74. No. 1. P. 104–110 (in Russian).

Многолетние изменения структуры населения дневных чешуекрылых (*Lepidoptera*, *Rhopalocera*) разнотравного луга

© 2018. А. Г. Татаринов, к. б. н., в. н. с., О. И. Кулакова, к. б. н., н. с.,
Институт биологии Коми научного центра Уральского отделения РАН,
167982, Россия, Республика Коми, г. Сыктывкар, ул. Коммунистическая, д. 28,
e-mail: tatarinov.a@ib.komisc.ru; kulakova@ib.komisc.ru

Приведены материалы по изучению многолетней динамики структуры населения и видового разнообразия дневных чешуекрылых двух разнотравных лугов в окрестностях г. Ухты Республики Коми. На участке пойменного луга за период 13-ти летних наблюдений заметных изменений в структуре населения *Rhopalocera* не произошло. Видовая группировка дневных чешуекрылых разнотравного луга, образовавшегося на месте лесной вырубki, трансформировалась в сторону обеднения и распада в ходе начавшегося самовосстановления ельника. Проведённые исследования в целом подтверждают вывод об устойчивости структуры населения дневных чешуекрылых в условиях сохранения состава и структуры фитоценозов в течение длительного времени. В границах одной конкретной фауны в аналогичных растительных сообществах, в том числе и вторичного происхождения, формируется сходное население дневных чешуекрылых. Это обуславливает возможность типологических описаний и экстраполяции при характеристике пространственно-временной организации населения *Rhopalocera* и создаёт основу для развития синтаксономического направления в лепидоптерологии.

Ключевые слова: дневные чешуекрылые, топическая группировка видов, видовое разнообразие, многолетняя динамика населения, разнотравный луг.

Long-term changes in the structure of the Butterflies population (*Lepidoptera*, *Rhopalocera*) on the mixed grass meadow

A. G. Tatarinov, O. I. Kulakova,
Institute of Biology of the Komi Science Centre of the Ural Division RAS,
28 Kommunisticheskaya St., Syktyvkar, Komi Republic, Russia, 167982,
e-mail: tatarinov.a@ib.komisc.ru, kulakova@ib.komisc.ru

Grass meadows are one of the main habitats of *Lepidoptera* in the taiga zone of the northeast of the Russian Plain. These plant communities are a convenient platform for the observation of *Rhopalocera* long-term population dynamics and species diversity. The article presents results of the study of long-term dynamics of the *Lepidoptera* population structure and species diversity in two grass meadows in the neighborhood of Ukhta city, Komi Republic. 47 species from six families were registered. During the 13-year observation period we did not notice any significant changes in the *Rhopalocera* population structure in the floodplain meadow. The *Lepidoptera* species group of the grass meadow formed on the site of forest felling was transformed towards depletion and decomposition during the spruce forest self-restoration. Succession changes in plant communities lead to the transformation of topical *Rhopalocera* groups, both towards increasing the species diversity and towards their degradation and complete decomposition. As a whole, the researches carried out confirm the conclusion about the stability of the structure of the population of *Lepidoptera* in conditions of preservation of the composition and structure of phytocenoses for a long time period. Within the boundaries of one particular fauna in similar plant communities, including secondary origin, a similar population of *Lepidoptera* is formed. This causes the possibility of typological descriptions and extrapolations in characterizing the spatio-temporal organization of the population of *Rhopalocera* and provides the basis for the development of a syntaxonomical direction in lepidopterology.

Keywords: butterflies, species-assemblage composition, species diversity, long-term dynamics of population, mixed grass meadow.

Многолетние изменения структуры населения и видового разнообразия насекомых в природных сообществах, в том числе в сукцессионных рядах, – одна из наименее исследованных проблем современной энтомологии. Это связано с отсутствием достаточного объёма накопленных материалов, проблемами методологического плана и сложностью интерпретации полученных данных, т.к. структура животного населения природных сообществ «отражает воздействие не только современных климатических условий и исторических причин, но и местных, биотопических и биоценологических условий» [1]. Вопросы многолетней динамики сообществ гораздо лучше проработаны в фитоценологии, что даёт «специалистам других областей знаний, интегрируемых экологией (зоологам, микологам, микробиологам, почвоведом и т. д.), канву, которая облегчает изучение динамики других по трофическому уровню и уровню организации компонентов экосистемы» [2]. Дневные, или булавоусые чешуекрылые выглядят интересным и перспективным модельным объектом для развития данного синэкологического направления в энтомологических исследованиях. Основой этому тезису служит их хорошая фаунистическая изученность, возможность визуальных количественных учётов имаго в полевых условиях, выраженная биотопическая приуроченность и быстрая ответная реакция на изменение условий окружающей среды колебанием состава и численности видов в растительных сообществах.

На территории Республики Коми дневные чешуекрылые в фаунистическом и геоэкологическом отношении хорошо изучены в окрестностях г. Ухты. Первые сведения о *Rhopaloscega* здесь были собраны К.Ф. Седых в середине 20 в. Опубликованный им список [3] содержал 54 вида и позже был дополнен еще 13 видами [4, 5]. К 2016 г. ухтинская локальная фауна насчитывала 77 видов из шести семейств [6]. Накоплены достаточно подробные сведения о пространственно-типологической структуре топических группировок видов [7], получены первые материалы о многолетней динамике населения дневных чешуекрылых сфагновых болот данного района [8].

Одними из основных местообитаний *Rhopaloscega* в таёжной зоне северо-востока Русской равнины являются разнотравные луга. Они характеризуются значительной видовой насыщенностью в травостое, что обеспечивает высокий уровень видового разнообразия заселяющих их дневных чешуекрылых. Учи-

таявая широкое распространение и богатую лепидоптерофауну, данные фитоценозы являются удобной площадкой для наблюдений за многолетней динамикой населения и видового разнообразия дневных чешуекрылых [7]. Первые результаты исследований по данной проблематике представлены в данной работе.

Материал и методика

Исследования проводились авторами статьи и студентами Сыктывкарского государственного университета в течение шести полевых сезонов в период с 2000 по 2013 гг. на двух избранных участках разнотравных (смешанно-крупнотравных) лугов на территории МОГО «Ухта» Республики Коми. Первый луговой участок (I) располагался в пойме р. Ухты удалении 10 км от ближайшего населённого пункта, п. Весёлый Кут (63°26'52" с.ш., 52°55'23" в.д.). Осью участка II служила бывшая лесовозная дорога, проложенная вглубь елового массива к лесным делянкам 15–20 летней давности (63°35'28" с.ш., 53°34'51" в.д.). Работы проводились на расширенном отрезке дороги, предназначенном для разъезда встречного транспорта, в начале наблюдений он был густо покрыт разнотравьем, по составу и структуре сходным с участком I.

В 2000 г. на обоих луговых участках верхний ярус травостоя слагали несколько относительно равнообильных видов растений: лабазник вязолистный, иван-чай узколистый, скерда сибирская, бодяк разнолистный, василистник малый, купырь лесной, аконит высокий, валериана волжская, вероника длиннолистная, вейник красный и другие крупные злаки. Во втором ярусе были обычны герань лесная, чемерица Лобеля, купальница европейская, гравилат речной, зверобой пятнистый и др. Нижний ярус формировали звездчатки, фиалки, горцы, одуванчик лекарственный. В 2000 г. оба луговых участка не были закустарены и в течение всего периода работ не испытывали прямого антропогенного воздействия (загрязнение бытовыми и промышленными отходами, вытаптывание людьми и домашними животными, сенокошение и пр.). Расстояние между участками около 38 км, формально они находятся в принятых нами границах ухтинской локальной фауны [6], что исключает влияние географического фактора на структуру топических группировок дневных чешуекрылых.

Данные о плотности видов дневных чешуекрылых на луговых участках, получен-

ные в результате визуальных учётов [9–11], пересчитаны и представлены в работе в форме относительного обилия видов. Этот показатель более наглядно отражает структуру и многолетнюю динамику населения *Rhopalocera* в растительных сообществах. Совокупность многочисленных (доминирующих по численности) и обычных (субдоминантных) видов в лепидоптерологии, как правило, именуют «фоновыми видами».

Оценка инвентаризационного разнообразия (α -разнообразия) видов дневных чешуекрылых на обследованных луговых участках дана с помощью широко применяющихся в экологических исследованиях индексов видового богатства Маргалефа (D_{Mg}), доминирования D , выравнивания Симпсона ($1-D_{Sm}$) и Бергера-Паркера (D_{B-P}). Дополнительно строились графики рангового распределения видов. Дифференцирующее, или β -разнообразие характеризовалось путём попарного сравнения состава и численности видов дневных чешуекрылых на луговых участках. В качестве показателя соответствия использовался индекс Чекановского-Сёренсена (I_{Ch-S}) для качественных и количественных данных. Формулы использованных индексов и обоснование их применения можно найти в литературе [12–15]. Математические расчёты проведены с помощью компьютерной программы Past v.3 [16].

Научная номенклатура видов и надвидовых таксонов дневных чешуекрылых представлена на основе анализа и компиляции данных двух каталогов [17, 18]. Русские названия растений даны по книге [19].

Результаты и обсуждение

В общей сложности за период исследований на обоих луговых участках было зарегистрировано 47 видов (46 на участке I и 40 на участке II) дневных чешуекрылых из шести семейств (табл.), что составляет 61% ухтинской локальной фауны и в полной мере отражает особенности пространственно-типологической структуры населения *Rhopalocera* смешанно-крупнотравных лугов на границе подзон средней и северной тайги северо-востока Русской равнины [7].

В первый год исследований на участке I было отмечено 38 видов дневных чешуекрылых. По результатам учётов, проводившихся в течение всего полевого сезона, доминирующими по численности являлись чернушки *Erebia ligea* и *E. euryale*. В состав фоновых

видов входили белянка *Pieris napi*, голубянка *Callophrys rubi*, перламутровки *Brenthis ino*, *Clossiana selene*, *C. euphrosyne*, шашечница *E. maturna*. В 2005 г. из состава доминантов «выпали» чернушки *E. ligea*, *E. euryale*, что объясняется особенностями их жизненного цикла. Как известно, данные виды имеют двухгодичную генерацию, имаго которой летает только в чётный или нечётный год.

Численность подобных хронографических субпопуляций в рамках одной локальной фауны и даже одного биотопа может существенно различаться. В окрестностях г. Ухты имаго обоих видов являются многочисленными в чётные годы, в нечётные – обилие *E. ligea* очень низкое, а бабочки *E. euryale* не встречаются совсем. Данную особенность необходимо учитывать при характеристике структуры доминирования и оценке видового разнообразия местных топических группировок *Rhopalocera* [7].

Луговой участок I имеет первичное происхождение, располагается в пойме р. Ухты и за период наблюдений практически не подвергся закустариванию, что, как правило, постепенно происходит с таёжными лугами, не включёнными в хозяйственный оборот. К 2012–2013 гг. на нём поднялось лишь несколько рассеянных кустов ив (в основном ивы филиколистной, ивы копьевидной) до 1,5 м высотой, состав и структура травостоя полностью сохранились. Структура населения и уровень инвентаризационного разнообразия дневных чешуекрылых за указанный отрезок времени здесь также существенных изменений не претерпели. Сходство видового состава в чётные 2000 и 2012 гг. составило – 91,4%, а с учётом количественных показателей – 73,2%, в нечётные 2005 и 2013 гг. – 90,9 и 74,1% соответственно.

На графике «ранг/обилие видов» (рис. 1) кривые 2000 и 2005 гг. по форме занимают промежуточное положение между кривыми, соответствующими моделям логарифмического и лог-нормального распределения. Привычный облик населения дневных чешуекрылых лугового участка I маскировался большим количеством бабочек боярышницы. Кривые доминирования видов на участке в 2012 и 2013 гг. чётко соответствуют модели лог-распределения, которое наблюдается, если в сообществах определяющее значение имеет один фактор или немногие экологические факторы [20]. Таким фактором можно считать большую численность в составе топических группировок бабочек боярышницы (*Aporia*

Таблица / Table
 Состав, относительное обилие (%) и показатели видовой разнообразия дневных чешукрылых смешанно-крупнотравных лугов в окрестностях г. Ухты
 Composition, abundance (%) and species diversity indicators of Rhopalocera on mixed-meadow grasslands in the vicinity of the Ukhta

Название вида/ Name of species	Участок, год наблюдений/ Site, year of observations												
	I						II						
	2000	2002	2005	2006	2012	2013	2000	2002	2005	2006	2012	2013	
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	
<i>Papilio machaon</i> L.	0,47	0,47	0,71	0,81	0,25	0,97	0,65	-	-	-	-	-	
<i>Leptidea sinapis</i> (L.)	2,39	3,76	3,21	2,56	1,43	3,44	5,29	4,99	8,09	4,37	4,58	5,34	
<i>L. morsei</i> (Fent.)	0,64	-	0,89	0,58	0,25	-	-	-	-	-	-	-	
<i>Pieris napi</i> (L.)	6,21	4,62	7,47	4,19	5,64	2,99	3,78	4,02	8,81	3,61	3,56	3,12	
<i>P. rapae</i> (L.)	1,75	0,68	1,59	1,51	0,76	0,88	0,43	0,42	0,54	-	-	-	
<i>Aporia crataegi</i> (L.)	1,11	1,03	2,31	3,38	22,49	27,23	2,05	1,94	4,32	4,86	22,64	27,34	
<i>Anthocharis cardamines</i> (L.)	1,43	1,37	2,49	2,21	0,93	2,03	2,71	2,22	3,42	2,85	2,29	3,71	
<i>Colias palaeno</i> (L.)	0,96	0,68	1,42	0,58	0,51	1,49	2,27	1,81	4,14	2,47	2,04	3,54	
<i>Gonepteryx rhamni</i> (L.)	0,79	1,21	2,31	1,75	1,94	1,32	0,86	1,52	2,88	1,14	-	0,81	
<i>Callophrys rubi</i> (L.)	7,32	6,77	10,49	4,89	3,29	3,62	4,76	5,26	7,37	4,56	4,07	11,93	
<i>Lycaena helle</i> ([Den. et Schiff.])	2,71	1,88	1,96	2,44	1,68	2,21	1,19	2,22	0,54	-	-	-	
<i>L. hippothoe</i> (L.)	-	0,85	1,07	1,39	0,42	2,47	-	-	-	-	-	-	
<i>L. virgaureae</i> (L.)	1,91	1,37	2,49	1,86	1,43	1,94	1,62	1,25	0,89	-	-	-	
<i>Celastrina argiolus</i> (L.)	1,27	0,68	0,53	1,05	0,93	0,53	1,41	1,52	1,26	0,76	1,53	-	
<i>Plebeius optilete</i> (Knoch)	-	0,51	1,96	0,81	2,02	1,68	3,57	3,59	5,76	3,42	3,82	6,98	
<i>Aricia artaxerxes</i> (Fabr.)	1,11	1,21	0,53	0,58	1,09	0,97	1,95	0,97	-	-	-	-	
<i>A. nicias</i> (Meig.)	0,79	0,68	1,07	0,23	0,59	0,44	-	-	-	-	-	-	
<i>A. eumedon</i> (Esp.)	2,39	1,88	3,38	1,51	2,11	2,91	2,82	2,35	2,34	-	-	-	
<i>Polyommatus icarus</i> (Rottl.)	0,96	0,85	1,97	1,75	0,67	1,85	1,51	0,83	1,44	-	-	-	
<i>P. amandus</i> (Schn.)	0,64	0,51	0,36	0,47	0,25	0,79	0,22	0,42	0,36	-	-	-	
<i>P. semiargus</i> (Rottl.)	2,07	2,9	3,21	2,91	3,21	3,97	3,89	3,05	2,69	2,09	1,78	-	
<i>Argynnis paphia</i> (L.)	-	0,85	0,53	0,47	0,59	1,68	0,43	2,08	1,62	2,85	2,04	2,05	
<i>Fabriciana adippe</i> (Rottl.)	0,16	0,34	0,36	0,35	-	-	-	-	-	-	-	-	
<i>Speyeria aglaja</i> (L.)	0,63	1,03	2,67	2,44	2,11	0,97	0,86	1,52	-	-	-	-	
<i>Brenthis ino</i> (Rottl.)	7,81	7,01	8,89	6,64	3,71	6,91	4,86	5,4	9,53	6,46	5,85	8,64	
<i>Clossiana eunomia</i> (Esp.)	0,96	-	-	0,35	0,25	0,11	1,84	0,55	0,72	0,95	-	-	

Продолжение таблицы

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
<i>C. selene</i> (Den. et Schiff.)	4,46	3,76	6,76	4,89	3,03	6,11	2,59	3,61	3,04	2,47	3,05	3,78
<i>C. euphrosyne</i> (L.)	5,25	5,98	8,54	5,12	4,71	5,05	5,62	5,68	7,73	7,98	4,07	6,34
<i>C. titania</i> (Esp.)	-	0,34	-	0,47	0,17	-	-	-	-	-	-	-
<i>Nymphalis antiopa</i> (L.)	3,03	1,37	2,14	1,05	1,43	2,47	5,29	3,19	6,65	4,94	6,11	6,58
<i>Aglais urticae</i> (L.)	-	0,51	-	-	-	0,79	0,54	-	-	-	-	-
<i>Polygonia c-album</i> (L.)	1,75	2,05	1,59	1,51	0,84	1,85	2,27	1,81	3,24	1,91	2,54	2,45
<i>Araschnia levana</i> (L.)	0,64	-	-	0,35	0,67	-	1,08	0,28	-	-	-	-
<i>Vanessa cardui</i> (L.)	0,47	0,34	0,36	0,12	-	0,11	0,43	-	0,18	-	-	-
<i>Euphydryas maturna</i> (L.)	3,98	3,25	4,45	4,66	2,78	3,53	3,78	4,29	2,89	2,85	1,78	-
<i>Melitaea diamina</i> (Lang)	1,43	0,68	1,59	0,69	0,34	-	1,62	0,69	-	-	-	-
<i>M. athalia</i> (Rott.)	2,23	3,08	3,21	3,84	2,36	2,19	1,95	1,66	1,62	1,52	-	-
<i>Lasiommata petropolitana</i> (Fabr.)	1,75	1,37	2,14	1,63	0,76	0,88	2,27	3,19	3,06	2,28	1,02	2,47
<i>Erebia ligea</i> (L.)	15,17	16,41	2,85	13,04	10,36	0,11	9,62	12,61	1,98	16,65	14,51	4,92
<i>E. euryle</i> (Esp.)	13,42	14,87	-	11,77	10,11	-	8,11	11,31	-	15,21	10,94	-
<i>Coenonympha tullia</i> (Müll.)	-	-	-	0,12	0,17	-	1,95	1,81	0,54	1,52	-	-
<i>Pyrgus malvae</i> (L.)	0,32	-	1,25	1,29	1,52	1,49	-	-	-	-	-	-
<i>Carthocephalus palaemon</i> (Pall.)	1,21	2,39	1,07	0,69	0,77	0,61	1,41	0,97	1,98	1,52	1,78	-
<i>C. silvicolus</i> (Meig.)	-	0,85	0,53	0,47	0,59	1,68	0,56	-	0,36	0,76	-	-
<i>Hesperia comma</i> (L.)	0,32	-	0,18	-	0,17	-	-	-	-	-	-	-
<i>H. sylvanus</i> (Esp.)	-	-	-	-	-	0,53	1,29	0,97	-	-	-	-
<i>Thymelicus lineola</i> (Ocs.h.)	-	-	-	1,05	1,18	0,88	0,65	-	-	-	-	-
Число видов, S	38	39	39	43	43	38	40	35	31	25	20	16
<i>D</i> _{мг}	5,743	5,964	5,844	6,212	5,933	5,261	5,719	5,166	4,746	3,831	3,181	2,731
<i>D</i>	0,064	0,073	0,050	0,055	0,086	0,091	0,042	0,054	0,056	0,078	1,104	0,116
<i>I-D</i> _{Sn}	0,936	0,927	0,950	0,945	0,914	0,909	0,956	0,946	0,944	0,922	0,896	0,884
<i>D</i> _{В-Р}	0,142	0,164	0,105	0,130	0,225	0,263	0,097	0,126	0,095	0,164	0,227	0,263

Примечание. Численно преобладающие виды выделены серым цветом.
 Note. Numerically prevailing species are highlighted in gray

crataegi), массовый лёт которой тогда шёл на всей территории Республики Коми. Данный фактор хоть и заметно повлиял на привычный облик населения и ранговое распределение видов в эти годы, несомненно, относится к категории случайных. Поэтому можно заключить, что рассматриваемая топическая группировка *Rhopalocera* по всем показателям имеет вполне сложившуюся структуру доминирования видов, устойчивую в долговременной перспективе при условии сохранения состава и структуры лугового фитоценоза.

На луговом участке II в 2000 г. было выявлено 40 видов дневных чешуекрылых. Как и на первом участке, здесь по численности доминировали чернушки *E. ligea* и *E. euryale*. В состав фоновых видов также входили голубянка *C. rubi*, перламутровка *B. ino*, *C. euphrosyne*, кроме того, весьма обильными были опушечно-лесные беляночка горошковая (*L. sinapis*) и траурница (*N. antiopa*). В нечётный 2005 г. при низкой численности имаго *E. ligea* и отсутствии *E. euryale* лидирующие позиции по обилию заняли перламутровка *B. ino*, белянки *P. napi*, *L. sinapis*. Состав субдоминантов практически не изменился.

В условиях средней и северной тайги вторичные луга на плакорах, к каковым относится рассматриваемый фитоценоз, неустойчивы и, если не используются под сенокосы или пастбища, начинают относительно быстро зарастать кустарниками и деревьями. К 2012–2013

гг. на участке II сформировался молодой ивняк разнотравный. Кустарниковый покров данного фитоценоза образован преимущественно ивой филиколистной, отмечены единичные кусты ивы козьей, ивы мирзинолистной, и. корзиночной и подрост берёзы пушистой. Высота кустарников не превышает 2,5 м, сомкнутость полога около 0,5–0,7. В верхнем ярусе травостоя преобладают лабазник вязолистный, аконит высокий, щавель кислый, дудник лекарственный, вейник красный, также встречаются иван-чай узколистный, скерда сибирская, бодяки. Второй ярус сложен в основном манжетками, геранью лесной, гравилатом речным, чемерицей Лобеля. Третий ярус сформировали немногочисленные фиалки, незабудки, седмичник европейский, грушанки.

Изменения в составе и структуре растительного покрова на участке II отразились на структуре населения и уровне видового разнообразия дневных чешуекрылых. К 2012–2013 гг. число видов уменьшилось в два раза, общий уровень инвентаризационного разнообразия, судя по значениям индексов, также снизился в этих пределах. Надо отметить, что почти все фоновые виды удержали лидирующие позиции, кроме того, в эти годы в массе летала боярышница (*A. crataegi*). Из состава топической группировки исчезли редкие и малочисленные виды, которые на графиках рангового распределения первых

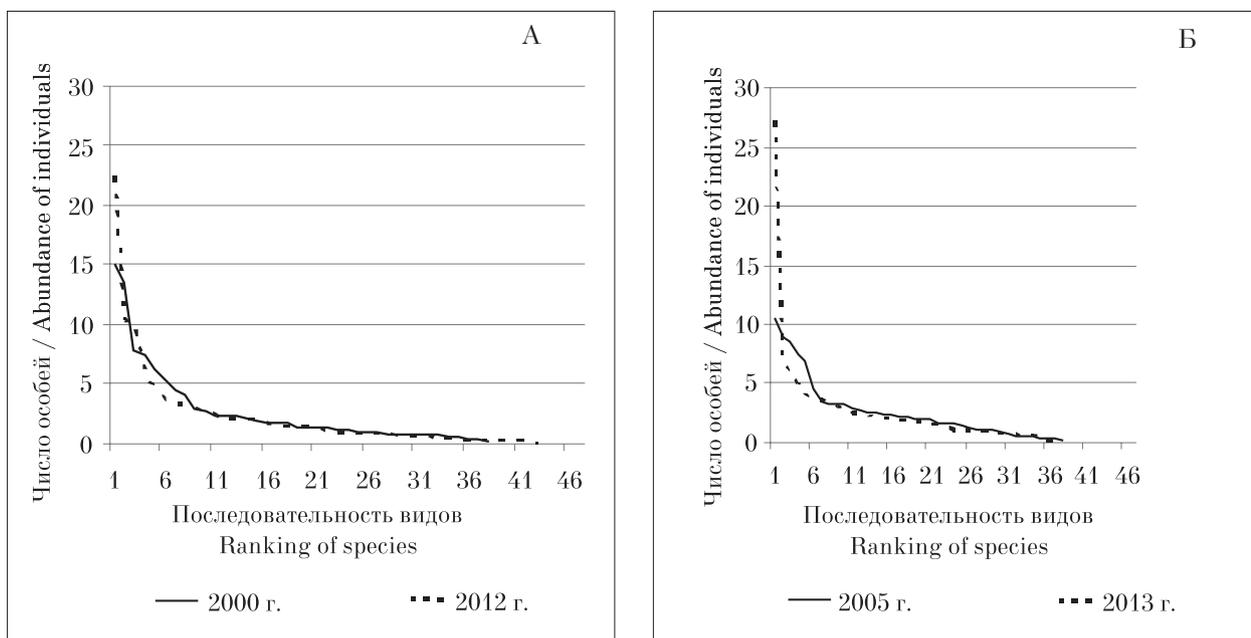


Рис. 1. Кривые рангового распределения видов дневных чешуекрылых на разнотравном лугу I в начале и конце периода наблюдений: А – чётные годы, Б – нечётные годы
Fig. 1. The rank distribution curves of species of *Rhopalocera* on a meadow grass I at the beginning and end of the observation period: A – even years, B – odd years

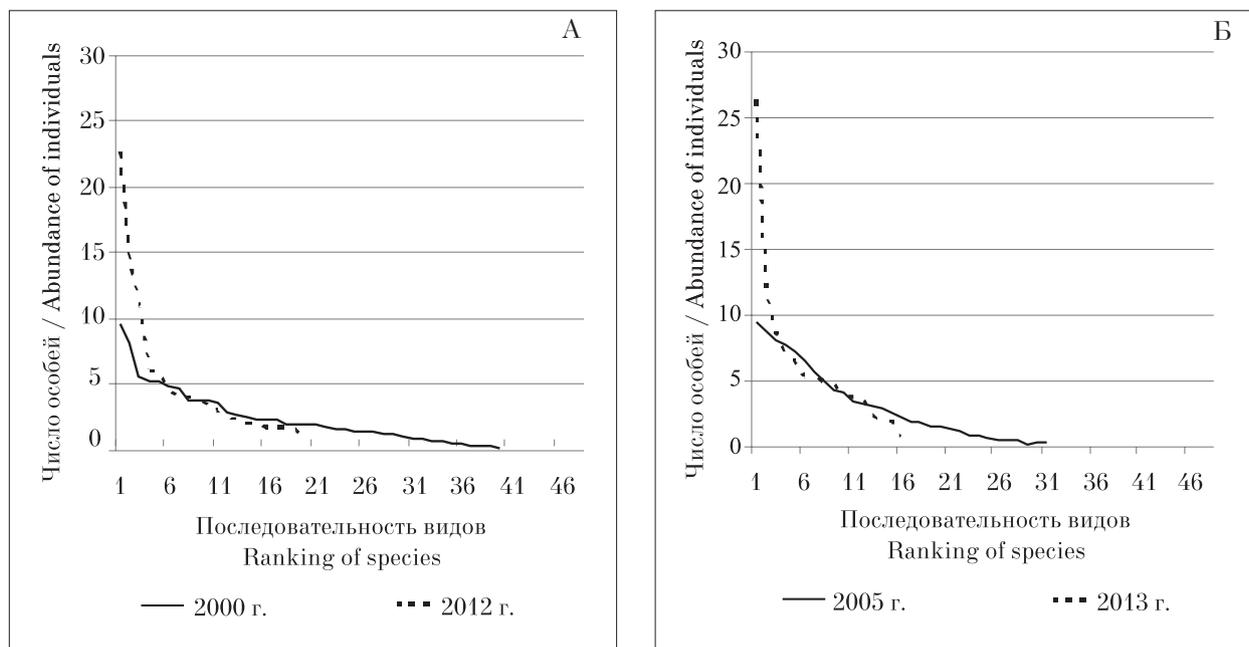


Рис. 2. Кривые рангового распределения видов дневных чешуекрылых на разнотравном лугу II в начале и конце периода наблюдений: А – чётные годы, Б – нечётные годы
Fig. 2. The rank distribution curves of species of Rhopalocera on a meadow grass II at the beginning and end of the observation period: А – even years, В – odd years

лет наблюдений формировали характерные «хвосты» кривых доминирования (рис. 2). В конце наблюдений форма этих кривых стала трансформироваться в сторону кривой, соответствующей модели геометрического ряда, которая, как известно, характеризует обеднённые сообщества, испытывающие сильную нагрузку под влиянием какого-либо экологического фактора, находящиеся в суровых условиях среды или на определённых стадиях сукцессии [20]. Сходство видового состава дневных чешуекрылых в чётные 2000 и 2012 гг. составило – 66,7%, с учётом численности – 57,7%, в нечётные 2005 и 2013 гг. – 68,1% и 59,6% соответственно.

Изменения в структуре населения Rhopalocera на участке II, несомненно, связаны с изменениями в составе и структуре растительного покрова. Данный смешанно-крупнотравный луг, по сути, сформировался на месте вырубki елового леса вследствие минерализации лесной подстилки и корней вырубленных деревьев. Так как он не использовался под сенокос или пастбище, с течением времени на нём начался классический сукцессионный процесс самовосстановления ельника, протекающий по модели толерантности [21]. Смешанное крупнотравье постепенно стало меняться на злаково-разнотравное сообщество, появились «растения-няни» [22] (ивы и подрост берёзы).

К сожалению, на момент написания статьи, авторы не имели сведений об изменениях, произошедших в данном фитоценозе с 2013 г. Тем не менее, с большой долей вероятности можно предположить, что в разнотравном ивняке, сформировавшемся на участке II, под кустарниковым пологом появилась или появится теневыносливая ель, крупное разнотравье сменится мелкими лесными видами. В дальнейшем в данном сукцессионном ряду под пологом ели, обладающей выраженным свойством пациентности, получат развитие пациентные лесные мхи, кустарнички и травы, которые окончательно уничтожат следы луговой растительности.

Развитие представленного сценария изменений в растительном покрове на участке II приведёт к значительной трансформации топической группировки Rhopalocera, которая в конечном итоге закончится её деградацией и распадом. Постепенно «выпадут» из состава населения ещё сохранившиеся и даже многочисленные к 2013 г. луговые хртофильные виды (*P. napi*, *B. ino*, *C. selene*), затем наступит очередь опушечных хртофилов (*Anthocharis cardamines*, *C. euphrosyne*, *Lasiommata petropolitana*) и, наконец, опушечных тамнодендрофилов и лесных гелиомезофилов (*Colias palaeno*, *Gonyopterix rhamni*, *C. rubi*, *Plebeius optilete*, *Agrynis paphia*, *N. antiopa*, *Polygonia calbum*). В темнохвойных еловых лесах северо-

востока Русской равнины население *Rhopalocera* с более-менее выраженной и устойчивой структурой фактически отсутствует [7].

Таким образом, за 13-летний период наблюдений две изначально сходные топические группировки дневных чешуекрылых развивались в совершенно разных направлениях. В структуре населения пойменного смешанно-крупнотравного луга каких-либо значительных изменений не произошло. Группировка видов поросшей разнотравьем лесной вырубки в процессе начавшейся восстановительной сукцессии стала трансформироваться в сторону обеднения и постепенного распада. Уровень сходства видового состава дневных чешуекрылых участков **I и II** в первый год наблюдений составил 90,4%, с учётом количественных показателей – 79,3%, в 2012 г. – 63,5%, и 48,5%, в 2013 г. – 51,9% и 34,6% соответственно.

Заключение

Смешанно-крупнотравные луга широко распространены в таежной зоне северо-востока Русской равнины и являются одними из основных местообитаний дневных чешуекрылых – их постоянно или временно заселяет более 50% видов региональной фауны. Данные фитоценозы характеризуются самыми высокими значениями показателей видового разнообразия *Rhopalocera* и могут рассматриваться в качестве модельного типа сообществ при выявлении закономерностей пространственно-временной организации населения дневных чешуекрылых.

Проведённые исследования в целом подтвердили вывод об устойчивости структуры населения дневных чешуекрылых в условиях сохранения состава и структуры фитоценозов в течение длительного времени [7]. Сукцессионные изменения в растительных сообществах приводят к трансформации топических группировок *Rhopalocera*, как в сторону повышения видового разнообразия, так и в сторону их деградации и полного распада.

В границах одной конкретной фауны в аналогичных растительных сообществах, в том числе и вторичного происхождения, формируется сходное население дневных чешуекрылых. Это обуславливает возможность типологических описаний и экстраполяций при характеристике пространственно-временной организации населения *Rhopalocera* и создаёт основу для развития синтаксономического направления в лепидоптерологии.

Работа выполнена в рамках государственного задания по теме «Распространение, систематика и пространственная организация фауны и населения наземных и водных животных таежных и тундровых ландшафтов и экосистем европейского северо-востока России», № гос. регистрации 0414-2018-0005.

Литература

1. Чернов Ю.И., Пенев Л.Д. Биологическое разнообразие и климат // *Успехи современной биологии*. 1993. Т. 113. № 5. С. 515–531.
2. Миркин Б.М., Наумова Л.Г. Динамика растительности: история и современное состояние теории // *Успехи современной биологии*. 1999. Т. 119. № 1. С. 15–29.
3. Седых К.Ф., Седых Е.Д. Дневные бабочки Ухтинского района Коми АССР // *Энтомологическое обозрение*. 1959. Т. 37. Вып. 4. С. 829–832.
4. Седых К.Ф. Животный мир Коми АССР. Беспозвоночные. Сыктывкар: Коми книжное издательство, 1974. 192 с.
5. Седых К.Ф. Новые виды, подвиды и дополнения к фауне чешуекрылых Коми АССР // *Географические аспекты охраны флоры и фауны на северо-востоке Европейской части СССР*. Сыктывкар, 1977. С. 97–108.
6. Татаринов А.Г. География дневных чешуекрылых европейского Северо-Востока России. М.: Товарищество научных изданий КМК, 2016. 255 с.
7. Татаринов А.Г., Долгин М.М. Видовое разнообразие булавоусых чешуекрылых на европейском Северо-Востоке России. СПб: Наука, 2001. 244 с.
8. Татаринов А.Г., Кулакова О.И. Многолетняя динамика структуры населения булавоусых чешуекрылых (Lepidoptera, Papilionoidea, Hesperioidea) сфагнового болота // *Теоретическая и прикладная экология*. 2009. № 2. С. 66–74.
9. Yamamoto M. Notes on the methods of belt transect census of butterflies // *J. Fac. Sci. Hokkaido Univ.* 1975. Ser. VI. Zool. V. 20. No. 1. P. 53–58.
10. Pollard E. A method assessing changes in the abundance of butterflies // *Biol. Conserv.* 1977. V. 12. No. 2. P. 115–134.
11. Pollard E., Yates T.J. Monitoring butterflies for ecology and conservation. The British butterfly monitoring scheme. London: Chapman & Hall, 1993. 274 p.
12. Лебедева Н.В., Кривоулицкий Д.А. Биологическое разнообразие и методы его оценки. М.: ВЛАДОС, 2004. 432 с.
13. Magurran A.E. Ecological diversity and its measurement. London and New York: Springer, 1988. 114 p.
14. Песенко Ю.А. Принципы и методы количественного анализа в фаунистических исследованиях. М.: Наука, 1982. 288 с.
15. Татаринов А.Г., Долгин М.М. Видовое разнообразие и методы его оценки. Сыктывкар: Изд-во Коми НЦ УрО РАН, 2010. 44 с.

16. Hammer Ø., Harper D.A.T., Ryan P.D. Paleontological Statistics software package for education and data analysis // *Palaeontologia Electronica*. 2001. V. 4 (1). 9 p.

17. Каталог чешуекрылых (Lepidoptera) России. СПб.–М.: Товарищество научных изданий КМК, 2008. 424 с.

18. Корб С.К., Большаков Л.Г. Каталог булавоусых чешуекрылых (Lepidoptera: Papilioniformes) бывшего СССР. 2-е издание, переработанное и дополненное // Эверсманния. Энтомологические исследования в России и соседних регионах. Тула: Гриф и К, 2011. Вып. 2. 124 с.

19. Груздев Б.И., Мартыненко В.А., Тарбаева В.М. Современная номенклатура сосудистых растений европейского Северо-Востока России. Сыктывкар: Изд-во Сыктывкарского ун-та, 1999. 136 с.

20. Giller P. Community structure and ecological niche. London and New York: Springer, 1984. 142 p.

21. Миркин Б.М., Наумова Л.Г., Соломеш А.И. Современная наука о растительности. М.: Логос, 2001. 264 с.

22. Gomez-Aparicio L., Zamora R., Gomez J.M., Hódar J.A., Castro J., Baraza E. Applying plant facilitation to forest restoration: a meta-analysis of the use of shrubs as nurse plants // *Ecol. Appl.* 2004. V. 14 (4). P. 112–1138.

References

1. Chernov Yu.I., Penev L.D. Biological Diversity and Climate // *Uspekhi sovremennot biologii*. 1999. V. 113. No. 5. P. 515–531 (in Russian).

2. Mirkin B.M., Naumova L.G. Dynamics of vegetation: history and the modern state of the theory // *Uspekhi sovremennot biologii*. 1999. V. 119. No. 1. P. 15–29 (in Russian).

3. Sedykh K.F., Sedykh E.D. Butterflies of the Ukhta district of the Komi ASSR // *Entomologicheskoye obozreniye*. 1929. V. 37. No. 4. P. 829–832 (in Russian).

4. Sedykh K.F. Fauna of the Komi ASSR. Invertebrates. Syktyvkar: Komi knizhnoe izdatelstvo, 1974. 192 p. (in Russian).

5. Sedykh K.F. New species, subspecies and additions to the fauna of Lepidoptera Komi ASSR // Geographical aspects of the protection of flora and fauna in the northeast of the European part of the USSR. Syktyvkar, 1977. P. 97–108 (in Russian).

6. Tatarinov A.G. Butterflies geography on the European North-East of Russia. Moskva: Tovarishchestvo nauchnyh izdaniy KMK, 2016. 255 p. (in Russian).

7. Tatarinov A.G., Dolgin M.M. Butterflies diversity on the European North-East of Russia. Sankt-Petersburg: Nauka, 2001. 244 p. (in Russian).

8. Tatarinov A.G., Kulakova O.I. Long-term population structure dynamics of Rhopalocera Lepidopterous insects (Lepidoptera, Papilionoidea, Hesperioidea) of peat moss bogs // *Teoreticheskaya i prikladnaya ekologiya*. 2009. No. 2. P. 66–79 (in Russian).

9. Yamamoto M. Notes on the methods of belt transect census of butterflies // *J. Fac. Sci. Hockaido Univ.* 1975. Ser. VI. Zool. V. 20. No. 1. P. 53–58.

10. Pollard E. A method assessing changes in the abundance of butterflies // *Biol. Conserv.* 1977. V. 12. No. 2. P. 115–134.

11. Pollard E., Yates T.J. Monitoring butterflies for ecology and conservation. The British butterfly monitoring scheme. London: Chapman & Hall, 1993. 274 p.

12. Lebedeva N.V., Krivolutsky D.A. Biological diversity and methods for its evaluation. Moskva: Gumanitarny izdatelskiy tsentr VLADOS, 2004. 432 p. (in Russian).

13. Magurran A.E. Ecological diversity and its measurement. London and New York: Springer, 1988. 114 p.

14. Pesenko Yu.A. Principles and methods of quantitative analysis in faunistic studies. Moscow: Nauka, 1982. 288 p. (in Russian).

15. Tatarinov A.G., Dolgin M.M. Species diversity and methods for its evaluation. Syktyvkar, 2010. 44 p. (in Russian).

16. Hammer Ø., Harper D.A.T., Ryan P.D. Paleontological Statistics software package for education and data analysis // *Palaeontologia Electronica*. 2001. V. 4 (1). 9 p.

17. Catalog of Lepidoptera of Russia. Sankt-Peterburg–Moskva: Tovarishchestvo nauchnyh izdaniy KMK, 2008. 424 p. (in Russian).

18. Korb S.K., Bolshakov L.G. Catalog of the Butterflies (Lepidoptera: Papilioniformes) of the former USSR // *Eversmannia*. 2011. Separate issue 2. 124 p. (in Russian).

19. Gruzdev B.I., Martynenko V.A., Tarbaeva V.M. The modern nomenclature of vascular plants of the European North-East of Russia. Syktyvkar: Izdatelstvo Syktyvkarского университета. 136 p. (in Russian).

20. Giller P. Community structure and ecological niche. London and New York: Springer, 1984. 142 p.

21. Mirkin B.M., Naumova L.G., Solomes A.I. Modern science of vegetation. Moskva: Logos, 2001. 264 p. (in Russian).

22. Gomez-Aparicio L., Zamora R., Gomez J.M., Hódar J.A., Castro J., Baraza E. Applying plant facilitation to forest restoration: a metaanalysis of the use of shrubs as nurse plants // *Ecol. Appl.* 2004 V. 14 (4). P. 1128–1138.

**Т. Я. Ашихмина. Учёный. Химик-эколог.
Педагог. Общественный деятель.
О книге из серии «Почётные граждане города Кирова»**



16 октября 2017 г. произошло событие, вызвавшее значительный интерес жителей г. Кирова. В большом читальном зале областной библиотеки им. А. И. Герцена состоялась презентация книги, посвящённой заведующей кафедрой фундаментальной химии и методики обучения химии Вятского государственного университета, заведующей лабораторией биомониторинга Института биологии Коми НЦ УрО РАН, главному редактору журнала «Теоретическая и прикладная экология» доктору технических наук, профессору Тамаре Яковлевне Ашихминой. Книга называется «Т. Я. Ашихмина. Учёный. Химик. Эколог. Педагог. Общественный деятель» (Киров: НКО «Золотой фонд Вятки», 2017. 624 с.). Это юбилейная, 25-я книга, посвящённая почётным гражданам г. Кирова, которая издаётся в уникальной серии «Золотой фонд Вятки».

В 2014 г. решением Кировской городской думы Тамаре Яковлевне Ашихминой присвоено звание «Почётный гражданин города

Кирова» за выдающиеся заслуги в педагогической и научной деятельности, огромный вклад в сохранение природных ресурсов и решение экологических проблем города Кирова и Кировской области, активную общественную деятельность.

Среди авторов книги (более 80 человек) – руководители города, общественные деятели, учёные, коллеги, ученики, друзья, родные Тамары Яковлевны.

Одна из первых статей сборника написана лётчиком-космонавтом СССР, дважды Героем Советского Союза Виктором Петровичем Савиных и называется она «Мы дружим с первой встречи». В ней наш знаменитый земляк, в первую очередь, отмечает огромный вклад Тамары Яковлевны в создание системы комплексного экологического мониторинга объектов хранения и уничтожения химического оружия, которая была успешно реализована при уничтожении запасов химического оружия на территории России на его малой родине в Оричевском районе Кировской области. Он отмечает, что Правительством Кировской области Тамаре Яковлевне было поручено обеспечить научное руководство по проведению научно-исследовательских работ при реализации данной программы в нашем регионе. При этом деятельность Т. Я. Ашихминой получила высокую оценку Федерального Управления по безопасному хранению и уничтожению химического оружия с вручением медали «За содружество в области химического разоружения».

О том, что Тамара Яковлевна занимает ведущее место среди известных людей, именами которых гордится Вятская земля и Вятский государственный университет пишет ректор университета Валентин Николаевич Пугач. Он отмечает в Тамаре Яковлевне талант учёного, активную жизненную позицию, сильное чувство социальной ответственности, которые сделали её личность действительно одной из самых значимых в развитии химии и научных подходов к проблемам экологии в Кировской области.

Другие авторы этой книги рассказывают о самых разных сторонах жизни и деятельности Тамары Яковлевны. Например, в разделе книги «Учёный» директор Института биологии Коми научного центра Уральского отделения РАН д. б. н., профессор С.В. Дёгтева отмечает,

что среди нескольких поколений учёных, которые внесли значительный вклад в становление и развитие Института биологии, находящегося в г. Сыктывкаре, особое место занимает Т. Я. Ашихмина, которая организовала новое научное подразделение – лабораторию биомониторинга, ставшую первой в Кировской области структурой РАН. Светлана Владимировна, как и В. П. Савиных, говорит об огромном вкладе Тамары Яковлевны и возглавляемой ею лаборатории в исследования для поддержания экологического равновесия в Кировской области. Так, на стадии проектирования объекта по уничтожению химоружия была выполнена оценка его возможного воздействия на окружающую среду и обоснованы размеры зоны защитных мероприятий. В дальнейшем было подготовлено научное обоснование системы комплексного экологического мониторинга, проведена оценка экологической ситуации в районе размещения объекта. По инициативе Т. Я. Ашихминой организована региональная лаборатория биотестирования, укомплектованная современным оборудованием.

С. В. Дёгтева пишет, что искреннее уважение коллег Тамары Яковлевны вызывает её умение выделять главное, мобилизовать коллектив на решение самых сложных научных задач. Она – яркий пример цельной личности, сочетающей в себе остроту ума, подлинную интеллигентность, щедрость души, чуткое отношение к людям с принципиальностью, беззаветной преданностью избранному делу, искренним патриотизмом.

Раздел «Педагог» включает статьи, написанные учителями города и преподавателями университета. Например, одна из учениц Тамары Яковлевны, кандидат биологических наук Светлана Геннадьевна Скугорева в статье «Учила своим примером» пишет слова, под которыми могли бы подписаться многие и многие: «Тамара Яковлевна – сильный и волевой человек, идущий к своей цели напрямик, не страшась никаких препятствий. За её спиной чувствуешь себя, как за каменной стеной! При всём том она очень дипломатична, я не помню, чтобы у нас в коллективе были какие-то затянувшиеся конфликты. Мне кажется, что она знает подход к каждому человеку, кем бы он ни был: и к студенту-троечнику, и к академику.

Пока Вы с нами, мы сильны, будем Вас поддерживать и помогать в осуществлении Ваших идей. Вы для меня – УЧИТЕЛЬ и пример для подражания».

Ещё об одной стороне деятельности Тамары Яковлевны Ашихминой в разделе «Патриот

земли Вятской» рассказывает директор областной научной библиотеки им. А. И. Герцена Надежда Павловна Гурьянова: «В течение 18 лет она работает в составе жюри ежегодной областной выставки «Вятская книга года». Приятно видеть, как она радуется хорошо изданной книге, отстаивает всегда (и убеждает) свою точку зрения. При этом это всегда делается дипломатично, неагрессивно». Надежда Павловна пишет, что суждения Тамары Яковлевны о книге, которые она высказывает на торжественном подведении итогов выставки, всегда глубоки, обоснованы и авторитетны, а получать Диплом лауреата выставки из её рук – большая честь для любого автора.

Авторы раздела «Гордость многодетной семьи» – родные и самые близкие друзья Тамары Яковлевны. Так, её любимая младшая сестра Любовь Яковлевна Ожегина назвала свой материал «Не шагает по земле, а летит, как ветер!». Она пишет: «Тамара всю свою жизнь жила и живёт по принципу: «Прежде думай о Родине, а потом о себе!» Однако мы все, её родные и друзья можем сказать, что и прежде, и потом она думает только о работе, о студентах, аспирантах, своих коллегах по университету, а на себя у неё не хватает времени. Уже много лет Тамара работает практически без нормальных отпусков и выходных, часто бывает в командировках, а сколько она пишет различных докладов, статей и книг – невозможно сосчитать. Трудно представить её иной ритм жизни, кажется, она не шагает по земле (кстати, она не умеет ходить медленно), а летит, как ветер!»

Огромную работу по составлению книги, обобщению всех наград и знаков общественно-государственного признания проделал Николай Николаевич Гаряев, руководитель издательского проекта «Почётные граждане города Кирова».

Но, безусловно, самыми яркими, пронзительными, интересными в этой книге стали страницы, написанные самой Т. Я. Ашихминой. Этот материал «Труд и только творческий труд – главное кредо моей жизни» даёт представление о незаурядном литературном таланте автора. По существу, это история становления девочки из глубинки Вятского края, которая, благодаря своему труду, таланту, одержимости наукой, врождённому, вероятно, от папы унаследованному великому дару организатора, стала крупным учёным, известным всей России. Стала человеком, чей дар убеждения позволяет вдохновлять людей на большие дела и свершения. Стала человеком, который открывает всё новые и новые пути и

горизонты для своих учеников и коллег, стала человеком, одним из самых известных и уважаемых в нашем городе.

Её воспоминания, опубликованные в книге, – это судьба поколения, которое родилось в победный 1945-й год. Необыкновенны слова благодарности и нежности, которые нашла Тамара Яковлевна, вспоминая своих родителей – папу Якова Матвеевича Ашихмина и маму Марию Владимировну. Очень недолгой была жизнь с папой, фронтовиком, председателем колхоза, который умер, когда Тамаре было всего 10 лет. Она пишет: «Нас очень любили родители. Не помню ни одного случая, чтобы папа или мама повысили на нас голос, не говоря уже о том, чтобы пригрозили ремешком. Мы тоже очень любили папу, охотно провожали его на работу, куда он ходил пешком и нёс младшую сестру на плечах, а меня всегда брал за руку... Понятия «рабочий день» у него не было. И после работы к нам домой постоянно со своими проблемами шли люди за помощью, за советом. Дом был практически, как контора. Всегда и всем он пытался помочь, хотя мы сами жили бедно.

А мама больше всего хотела, чтобы мы получили образование, которого ей не удалось получить... Благодарна маме за то, что она с детства приучила нас к труду, научила шить, вязать, воспитывала в строгости, мы обязательно должны были спросить разрешения пойти в клуб, назначала время, в которое мы должны были быть дома».

Страницы воспоминаний Т. Я. Ашихминой можно читать бесконечно – и как учились сельские школьники в 50-е годы, какова была институтская жизнь – в 60-е, какую роль играл комсомол в те давние советские годы, как шло становление молодого учёного, сумевшего всего за 2 года подготовить и защитить кандидатскую диссертацию по химии. Были очень сложные годы распада великой страны, прошедшие через сердце Тамары Яковлевны как большое личное горе.

Но один из главных жизненных принципов Т. Я. Ашихминой – жить завтрашним днём. Всё, что успела сделать, – это хорошо, но это – уже вчерашний день. Сегодня новые задачи и новые проблемы.

Надо видеть, с каким энтузиазмом Тамара Яковлевна увлекает сотрудников кафедры, возглавляемой ею уже 30 лет, коллектив ла-

боратории биомониторинга на проведение Всероссийских конференций с международным участием на базе уже нового опорного Вятского государственного университета, на разработку научных проектов и участие в конкурсах Российского фонда фундаментальных исследований, Российского научного фонда, на получение грантов Правительства и Президента РФ.

Не случайно на 2017–2019 гг. под её научным руководством были сделаны заявки и получили Гранты Президента РФ на поддержку молодых учёных двое преподавателей, возглавляемой ею кафедры Т. А. Адамович и Е. В. Товстик.

Да и сама Тамара Яковлевна с коллегами лаборатории биомониторинга стали победителями конкурса РФФИ по изданию научной монографии. В феврале 2017 г. журнал «Теоретическая и прикладная экология», создателем и главным редактором которого она является, был включён в самый престижный список научных изданий, входящих в международную базу данных Scopus. Подобная высокая оценка в области научной деятельности кафедры, безусловно, не только награда и оценка самой Тамары Яковлевны, но это и вклад в научные достижения, прежде всего, её любимого университета, который, став опорным в регионе с каждым днём, с каждой новой, в том числе научной победой становится более масштабным и значимым во всех делах и направлениях развития отечественного образования и науки.

Безмерно любимый Тамарой Яковлевной Вятский край также безмерно любит её и гордится своей землячкой – почётным гражданином г. Кирова, выдающимся учёным-экологом, умелым руководителем и организатором, мудрым наставником и верным товарищем.

Эта книга, написанная неравнодушными людьми, которые знают Тамару Яковлевну с разных сторон, – доказательство того, какими талантами богата Россия, какой золотой фонд страны составляют подобные люди.

*Л. И. Домрачева,
доктор биологических наук,
профессор кафедры биологии растений,
селекции и семеноводства, микробиологии
Вятской ГСХА*

70-летие Василия Алексеевича Сысуева



14 февраля 2018 года исполнилось 70 лет со дня рождения Василия Алексеевича Сысуева, научного руководителя Федерального аграрного научного центра Северо-Востока им. Н. В. Рудницкого (ФАНЦ Северо-Востока).

Василий Алексеевич, академик РАН, доктор технических наук, профессор, член Отделения сельскохозяйственных наук РАН – авторитетный учёный в области механизации сельского хозяйства, автор свыше 530 научных публикаций, в том числе 50 монографий и рекомендаций, около 100 авторских свидетельств и патентов Российской Федерации на изобретения. За рубежом (Польша, Китай, Чехия, Болгария, Бельгия, Турция, Египет, Венгрия, Беларусь, Украина) издано более 80 научных трудов.

Василий Алексеевич – признанный лидер аграрной науки Евро-Северо-Востока. Василий Алексеевич стал инициатором интеграционного проекта по созданию ФАНЦ Северо-Востока и в настоящее время является научным руководителем объединённой организации. Особое значение Василий Алексеевич придаёт подготовке молодых учёных, готовит аспирантов, руководит работой объединённого совета Д 999.143.03 по защите докторских и кандидатских диссертаций при ФАНЦ Северо-Востока.

Василий Алексеевич активно пропагандирует достижения аграрной науки на российских и международных научных форумах, возглавляет Комитет по инновациям и науке Вятской торгово-промышленной палаты, является главным редактором научного журнала «Аграрная наука Евро-Северо-Востока», членом редколлегий журналов «Теоретическая и прикладная экология», «Достижения науки и техники АПК», «Сельский механизатор».

В. А. Сысуеву присвоено Почётное звание «Заслуженный деятель науки РФ», он является Почётным гражданином Котельничского района Кировской области, награждён серебряными медалями и дипломами ВВЦ, Почётной грамотой Совета Федерации Федерального Собрания Российской Федерации.

Редколлегия журнала «Теоретическая и прикладная экология» выражает Василию Алексеевичу искреннюю признательность и благодарность за сотрудничество и поздравляет его с юбилеем, желает творческих успехов, личного счастья и богатейшего здоровья.

*Редколлегия журнала
«Теоретическая и прикладная
экология».*

Интеграция образования и науки – важнейший фактор развития опорного классического университета

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Вятский государственный университет» (ФГБОУ ВО «ВятГУ») – один из классических вузов России – расположен в г. Кирове, областном центре Кировской области и является основным «поставщиком» кадров с высшим профессиональным образованием для бюджетообразующих секторов экономики области и органов власти региона.

В университете создано 9 институтов: биологии и биотехнологий, экономики и менеджмента, гуманитарных и социальных наук, химии и экологии, математики и информационных систем, политехнический, педагогический, юридический институты, институт непрерывного образования российских и иностранных граждан. В составе институтов – 13 факультетов и 72 кафедры, на которых работает более 1000 преподавателей и научных сотрудников. По очной, вечерней и заочной формам обучается 21880 студентов, 2436 магистрантов, 296 аспирантов.

Главной, стратегической целью опорного университета является дальнейшее формирование исследовательского и предпринимательского регионального университета, ориентированного на достижение позиции национального лидера в области «наук о жизни». Деятельность университета тесно связана с развитием региональной промышленности, что и обусловило выбор в качестве приоритетных направлений развития университета, подготовку кадров по ведущим и востребованным направлениям в области биотехнологии и химической технологии, педагогических наук, биоинформатики и IT-технологии, наук об обществе. Реализация этой цели путём соединения образования и науки, использования инновационных форм сотрудничества с НИИ, предприятиями, учреждениями образования позволяет Вятскому государственному университету готовить необходимые кадры для развития региона.

В университете создан и активно развивается центр превосходства «Фармацевтическая биотехнология», четыре междисциплинарных центра компетенций: «Промышленный и бизнес-инжиниринг», «Полимерные материалы», «Экологические технологии и системы», «Биологические ресурсы».

В рамках Программы развития Опорного университета реализуются стратегические проекты:

- Центр превосходства «Фармацевтическая биотехнология» как основа формирования биофармацевтической промышленности региона;
- Агентство образовательной инноватики;
- Университет проектных команд для решения системных задач региональных партнеров;
- Региональный штаб позитивных изменений.

В университете создана образовательная и научно-прикладная база по широкому спектру технических, естественных, социальных, педагогических, гуманитарных и экономических наук. Сформированы творческие кооперации с научными организациями РАН (Институт биологии Коми НЦ УрО РАН, Институт физико-химических и биологических проблем почвоведения РАН, Институт физиологии Коми НЦ УрО РАН), российскими и зарубежными вузами (университет штата Висконсин-Мэдисон, Словацкий университет технологий в Братиславе, Белорусская государственная сельскохозяйственная академия, Северо-Восточный федеральный университет имени М.К. Аммосова), государственно-частное партнёрство с ведущими отечественными биофармацевтическими и биотехнологическими фирмами (биомедицинский комплекс «НАНОЛЕК», ООО «Кировский БиоХимЗавод», ООО «Восток»). Такая интеграция вузовской науки на региональном, федеральном и международном уровнях явилась основанием для включения биотехнологии как приоритетного направления в Программу развития Кировской области до 2020 г.

Университет является центральной научно-исследовательской площадкой региона, ориентированной, прежде всего, на приоритетные направления социально-экономического развития Кировской области (постановление Правительства Кировской области от 06.12.2009 №33/432): «Фармацевтическая биотехнология», «Технология переработки полимеров», «Химия окружающей среды», «Экологические технологии и системы», «Использование биологических ресурсов».

ВятГУ осуществляет фундаментальные и прикладные научные исследования, экспериментальные и опытно-конструкторские разработки по всем основным областям знаний: общественные науки, естественные и точные науки, технические и прикладные науки, общепромышленные и комплексные проблемы (межотраслевые проблемы).

Общественные науки. Исследования развиваются по 16 направлениям: народное образование (педагогика), история (исторические науки), экономика (экономические науки) и другие, объём финансирования исследований составил 89,8 млн руб. Источник финансирования – бюджетные средства и средства фондов: фонд инфраструктурных и образовательных программ, Правительство Кировской области, администрации муниципальных образований, предприятия и индивидуальные предприниматели региона.

Естественные и точные науки. В этой области научных исследований развивается 6 направлений. Объём исследований по химии, биологии, математике за последние 5 лет составил 64,2 млн руб. Основные источники финансирования – бюджетные средства и средства фондов, (РМНПЦ «Росплазма», Правительство Кировской области, администрации муниципальных образований).

Технические и прикладные науки. Объём финансирования исследований по 19 направлениям в области: биотехнология, химическая технология, энергетика и другие составил 193,1 млн руб. Источник финансирования: бюджетные средства и средства фондов, Биомедицинский комплекс «НАНОЛЕК», ООО «ГалоПолимер Кирово-Чепецк», ОАО «ЗМУ КЧХК», ООО «НТЦ «Интайр», Фонд Сильвио Трончетти (Fondazione Silvio Tronchetti Provera).

Общепромышленные и комплексные проблемы (межотраслевые проблемы). Исследования развиваются по 3 направлениям, основным из которых является «Охрана окружающей среды», «Экология человека» с объёмом исследований – 38,7 млн руб. Источник финансирования – бюджетные средства и средства фондов, ООО «Лукойл-Пермьнефтепродукт», ОАО «ЗМУ КЧХК», ООО «Вятполимертех», Администрация МО «Город Киров», ОАО НИПИИ «Кировпроект», ФБУ «ГосНИИЭНП», ООО «ГалоПолимер Кирово-Чепецк».

Кроме того, организовано творческое взаимодействие с индустриальными партнерами: Омутнинский металлургический завод, завод «Авитек», электромашиностроительный

завод «Лепсе», Кировский шинный завод, биомедицинский комплекс «НАНОЛЕК», АО «Научно-исследовательский институт средств вычислительной техники» и многие другие.

На базе опорного университета многие годы проводится подготовка бакалавров и магистров по специальностям «Экология и природопользование», «Ресурсосбережение в промышленности», «Техносферная безопасность», «Химия окружающей среды», а также действуют аспирантуры: «Экология», «Геоэкология». «Экологическая безопасность и мониторинг технологических процессов и производств».

При этом работа по подготовке специалистов, бакалавров и магистров за последние годы существенно перестраивается. Магистранты и студенты привлекаются к исследовательским проектам, инновационным изысканиям по экологической проблематике, в том числе в сфере предпринимательства и бизнеса, профессионально-технического обучения, к разработке качественных и инновационных экологических проектов и программ.

Не случайно одним из приоритетных направлений научных исследований коллективов кафедр в рамках стратегии развития Института химии и экологии опорного университета ВятГУ принята крайне актуальная на сегодня тематика «Разработка технологий, методов и подходов по переработке промышленных и бытовых отходов». У каждой кафедры в этом направлении есть определённый задел, который предстоит развить под конкретные задачи и проекты. Безусловно, ведущая роль в реализации данного направления возлагается на молодые кадры, магистрантов, аспирантов.

Создание на базе опорного университета единого центра компетенций в области экотехнологий и систем продиктовано необходимостью в регионе решать проблемы модернизации промышленных предприятий, участие в разработке современных технологий очистки стоков, вовлечение образующихся отходов во вторичный оборот. Наибольшую потребность в таких разработках испытывают предприятия коммунально-бытового сектора; предприятия химической отрасли и машиностроения; объекты животноводства и птицеводства.

В перспективе ВятГУ должен стать центром разработки и масштабирования экотехнологий в Кировской области. Создание Центра позволит коммерциализировать отдельные типовые разработки в регионе; тиражировать новые отраслевые технологии в другие регионы; стать точкой роста для разработки новых

систем анализа с использованием экспресс-методов аналитического контроля; стать базовой площадкой в решении актуальных экологических проблем производственного и коммунально-бытового сектора региона и в опережающем порядке обеспечить работу предприятий в соответствии с новыми требованиями.

Активно вовлекаются в научно-исследовательскую работу по изучению проблем региона студенты, магистранты и аспиранты университета, участвуя в проектной деятельности, в конференциях и научных конкурсах, выполняя тематические курсовые, выпускные квалификационные работы, магистерские и кандидатские диссертации. Доцентами кафедры фундаментальной химии и методики обучения химии Т. А. Адамович и Е. В. Товстик получены гранты Президента Российской Федерации для поддержки молодых учёных по проектам: «Разработка инструментария оценки состояния лесных и водных экосистем по материалам дистанционного зондирования Земли на примере заповедника "Нургуш"», «Эколого-биологическое исследование состояния почв, подверженных инвазии борщевиком Сосновского с использованием данных дистанционного зондирования Земли».

2017 год был объявлен Президентом РФ В.В. Путиным Годом экологии. Для всех кафедр, факультетов, институтов, научных центров и лабораторий Вятского государственного университета этот год был очень насыщенным на события, мероприятия и акции в области природоохранной деятельности.

Наиболее масштабным был апрельский форум «ЭкоКиров-2017». Опорный университет в партнёрстве с Правительством области, администрацией г. Кирова, Вятской торгово-промышленной палатой и общественными организациями организовали и провели на базе университета научно-практическую конференцию «Опыт промышленных предприятий Кировской области по снижению негативного воздействия на окружающую среду». В ходе её были подписаны «Соглашения о сотрудничестве в области совершенствования методов очистки промышленных стоков» между пятью крупнейшими предприятиями: АО Завод «Лепсе», АО «Завод ОЦМ», ОАО «Сельмаш», АО «Авитек», АО «Ново-Вятка» с органами власти (Губернатором Кировской области), Министерством охраны окружающей среды Кировской области, Управлением Росприроднадзора по Кировской области, Вятской торгово-промышленной палатой и ВятГУ.

Кроме того, в рамках форума «ЭкоКиров-2017», на базе университета проведены XII Всероссийская научно-практическая конференция с международным участием «Экология родного края: проблемы и пути их решения»; минифорум «Инновационные решения в сфере экологического образования и просвещения для года экологии»; научный семинар «Эколого-биологические аспекты устойчивого функционирования наземных и водных экосистем»; региональный конкурс студенческих научных работ «Молодёжь в экологии»; фотовыставка и конкурс «Вятские фотохудожники о природе» и многое другое.

Студенты и преподаватели ВятГУ в Год экологии активно содействовали в организации мероприятий и осуществлении экологических программ и мероприятий на территории Кировской области. Участвовали в проведении Всероссийского экологического урока «Сделаем вместе» в учреждениях образования г. Кирова и Кировской области, приняли участие в экологических субботниках по очистке берегов рек и водохранилищ, в посадке деревьев. Открыта «Экологическая клиника» – проект, который реализован в виде онлайн-ресурса на сайте университета и работает на постоянной основе. Любой желающий может задать вопрос на экологическую тему, на который преподаватели и студенты оперативно отвечают. Большой отклик от населения города получен на проект «Какую воду мы пьём», в рамках которого весной организуется приём проб питьевой воды от населения и проводится на бесплатной основе химический анализ её качества.

Событием особой важности в Год экологии явилось и то, что издаваемый лабораторией биомониторинга Института биологии Коми НЦ УрО РАН и Вятского государственного университета журнал «Теоретическая и прикладная экология» 10 февраля 2017 г. на заседании экспертной комиссии Scopus включён в международную базу данных, а также получен грант РФФИ на издание монографии «Микроорганизмы как агенты биомониторинга и биоремедиации загрязнённых почв» (под редакцией Т. Я. Ашихминой, Л. И. Домрачевой).

Опорный университет на постоянной основе, не только в Год экологии, работает над экологической проблематикой. Это направление активно развивается в проектной деятельности многих кафедр университета, в исследовательской деятельности совместной научно-исследовательской лаборатории биомониторинга, центров компетенций: «Эколо-

гические технологии и системы», «Использование биологических ресурсов», а также в работе экоаналитической лаборатории, аккредитованной по 246 показателям химического и 10 показателям биологического контроля и мониторинга.

Уже несколько лет университетская жизнь развивается под девизом «Поступай правильно!» Изначально он звучал как призыв к абитуриенту, однако за последнее время акцент смещается и в адрес всего коллектива университета в смысле – «Поступай правильно

по жизни». Поступай так, чтобы с университета – драйвера развития региона, можно было взять пример во всех направлениях: будь то наука, образование, их интеграция в экологию, в производство, в развитие всех сфер жизни и деятельности региона.

*В. Н. Пугач,
к.э.н., ректор Вятского
государственного университета*



Центр компетенций «Использование биологических ресурсов»



Получатели гранта Президента РФ доценты Т. А. Адамович, Е. В. Товстик и научный руководитель зав. кафедрой, профессор Т. Я. Ашихмина



Центр превосходства «Фармацевтическая биотехнология»



Центр компетенций «Экологические технологии и системы»



Экоаналитическая лаборатория



Центр компетенций «Полимерные материалы»



Центр компетенций «Экологические технологии и системы»

Индекс 82027, 48482



ISSN 1995-4301



9 771995 430004