



2017

*Теоретическая
и прикладная*

ЭКОЛОГИЯ

ISSN 1995-4301

№ 2



**ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ
ПРОБЛЕМЫ
ЭКОЛОГИИ**

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

**МОНИТОРИНГ
АНТРОПОГЕННО
НАРУШЕННЫХ
ТЕРРИТОРИЙ**

АГРОЭКОЛОГИЯ

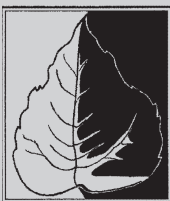
ЭКОТОКСИКОЛОГИЯ

**ЭКОЛОГИЗАЦИЯ
ПРОИЗВОДСТВА**

**СОЦИАЛЬНАЯ
ЭКОЛОГИЯ**

**ХРОНИКА
СОБЫТИЙ
И МЕРОПРИЯТИЙ**

ОБЩЕСТВЕННО-НАУЧНЫЙ ЖУРНАЛ



**Теоретическая
и прикладная
ЭКОЛОГИЯ**
№ 2, 2017
<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).

Учредитель журнала ООО Издательский дом «Камертон»

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ

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

Зам. главного редактора В.В. Гутенёв, д.т.н., профессор, первый зам. председателя Комитета Государственной Думы РФ по промышленности

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 биотехнологии растений и микроорганизмов Зонального научно-исследовательского института сельского хозяйства Северо-Востока им. Н.В. Рудницкого

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

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

Журнал издаётся при поддержке ФГБОУ ВО «Вятский государственный университет». 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 массовых коммуникаций, связи и охраны культурного наследия. 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. Факс (495) 281-37-98 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. Тел. (8332) 32-28-39. E-mail: okrat@okrat.ru
Оригинал-макет – Татьяна Коршунова, фото на обложке – Александр Широких, перевод – Ирина Кондакова, Григорий Кантор, выпускающий редактор – Мария Зелаева
Директор издательства «О-Краткое» Евгений Дрогов © Оформление. Издательство «О-Краткое»

Подписано в печать 20.06.2017. Тираж 1150 экз. Заказ № 342.

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

ЧЛЕНЫ РЕДАКЦИОННОГО СОВЕТА:

- В.А. Алексеев** д.т.н., профессор Ижевского государственного университета
- А.М. Асхабов** д.г.-м.н., академик РАН, Председатель Президиума Коми НЦ УрО РАН
- С.И. Барановский** д.т.н., профессор, заместитель председателя Общественного совета «Росатома», председатель Российского экологического конгресса
- Л.И. Домрачева** д.б.н., профессор Вятской государственной сельскохозяйственной академии
- М.В. Дородников** к. с.-х. н., Университет Гёттингена им. Георга Августа (Германия)
- И.Е. Дубовик** д.б.н., профессор Башкирского государственного университета
- Г.П. Дудин** д.б.н., профессор, зав. кафедрой биологии растений, селекции и семеноводства, микробиологии 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
- В.Г. Ильницкий** д.э.н., директор ОАО «Научно-исследовательский проектно-изыскательский институт «Кировпроект»
- Г.Я. Кантор** к.т.н., научный сотрудник Института биологии Коми НЦ УрО РАН
- Е.Ю. Колбовский** д.г.н., профессор, в.н.с. Московского государственного университета им. М.В. Ломоносова
- Э.И. Коломиец** д.б.н., член-корреспондент НАН Беларуси, директор Института микробиологии НАН Беларуси
- Л.В. Кондакова** д.б.н., профессор, зав. кафедрой экологии Вятского государственного университета
- А.В. Кучин** д.х.н., член-корреспондент РАН, профессор, директор института химии Коми НЦ УрО РАН
- В.Н. Лаженцев** д.г.н., член-корреспондент РАН, профессор, советник РАН
- В.З. Латыпова** д.х.н., член-корреспондент 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., и.о. проректора по науке и инновациям ВятГУ
- В.А. Малинников** д.т.н., профессор, проректор 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-корреспондент РАН, зав. лаб. молекулярной радиобиологии и геронтологии Института биологии Коми НЦ УрО РАН
- С.В. Пестов** к.б.н., доцент Вятского государственного университета
- О.Ю. Растегаев** д.х.н., заместитель директора Государственного научно-исследовательского института промышленной экологии
- С.А. Рубцова** д.х.н., старший научный сотрудник, зам. директора Института химии Коми НЦ УрО РАН
- В.П. Савиных** д.т.н., член-корреспондент 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, директор Зонального научно-исследовательского института сельского хозяйства Северо-Востока им. Н.В. Рудницкого
- В.И. Холстов** д.х.н., директор Департамента реализации конвенционных обязательств Министерства промышленности и торговли РФ
- Т.А. Трифонова** д.б.н., профессор Московского государственного университета им. М.В. Ломоносова
- М.Х. Хусейн** д.б.н., профессор Университета Ассиут (Египет)
- В.Т. Юнгблюд** д.и.н., профессор Вятского государственного университета



*Theoretical
and applied*
ECOLOGY
№ 2, 2017

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 founder of the magazine Publishing house «Kamerton»

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

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 V.V. Gutenev,

Doctor in Technical Sciences, Professor, First Deputy Chairman of the State Duma Committee on Industry

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, Rudnitskiy Zonal Research Institute of Agriculture of the North-East

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: ecolab2@gmail.com

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

Subscription index 82027, 48482
in the catalogue of Agency «Rospechat»
To effect subscription it is necessary to address to one of the partners of JSC «MK-Periodica» in your country or to JSC «MK-Periodica» directly.
Address: 39 Gilyarovskiy st., Moscow, Russia, 129110.
Tel: (495) 281-91-37, 281-97-63, Fax: (495) 281-37-98
E-mail address: info@periodicals.ru
<http://www.periodicals.ru>

Prepared for publication by the publishing house of «O-Kratkoe» of. 101, 4 Dynamoskiy proezd, Kirov, 610000
Tel. +7 (8332) 32-28-39. E-mail: okrat@okrat.ru.
Designer – Tatiana Korshunova. Cover photo – Aleksandr Shirokikh.
Translation – Irina Kondakova, Grigoriy Kantor.
Managing editor – Maria Zelaeva
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:

- V.A. Alexeyev** Doctor in Technical Sciences, Professor of Udmurt State University
- A.M. Askhabov** Doctor in Geology and Mineralogy, Academician of RAS, Chairperson of the Komi Science Centre of the Ural Division RAS
- S.I. Baranovskiy** Doctor in Technical Sciences, Professor, Vice-Chairperson of the Rosatom Social Council, Chairperson of the Russian Ecological Congress
- L.I. Domracheva** Doctor in Biology, Professor of Vyatka State Agricultural Academy
- 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. Yevdokimova** 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
- V.G. Ilitskiy** Doctor in Economics, Director of Ltd Research Project Institute «Kirovproect»
- G.Ya. Kantor** PhD in Technical Sciences, researcher of the Institute of Biology of the Komi Science Centre of the Ural Division RAS
- E.Yu. Kolbovskiy** 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
- A.V. Kuchin** Doctor in Chemistry, corresponding member of RAS, Professor, Director of the 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** Director of Mycology Institute of Jilin Agricultural University, Foreign Associate of RAS (China)
- S.G. Litvinets** PhD in Agricultural Sciences, acting Vice-Rector for Science and Innovation of Vyatka State University
- V.A. Malinnikov** Doctor in Technical Sciences, Professor, Vice-Rector of Moscow State University of Geodesy and Cartography
- A.A. Moskalev** Doctor in Biology, corresponding member of RAS, Chief of the Laboratory of Molecule Radiobiology and Gerontology 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
- O.Yu. Rastegayev** Doctor in Chemistry, Vice-Director of State Research Institute of Industrial Ecology
- S.A. Rubtsova** Doctor in Chemistry, senior researcher, Vice-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. Skapini** Doctor in Biology, Professor of Florence University (Italy)
- V.A. Sysuev** Doctor in Technical Sciences, Academician of RAS, Director of Rudnitskiy Zonal Research Institute of Agriculture of the North-East
- T.A. Trifonova** Doctor in Biology, Professor of Lomonosov Moscow State University
- V.I. Kholstov** Doctor in Chemistry, Professor, Director of the Conventional Obligations Implementation Department of the Industry and Trade Ministry of the Russian Federation
- M.Kh. Husseyn** Doctor in Biology, Professor of University of Assiut University (Egypt)
- V.T. Yungblyud** Doctor in History, Professor of Vyatka State University

СОДЕРЖАНИЕ

ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ПРОБЛЕМЫ ЭКОЛОГИИ

- А. В. Яблоков, В. Ф. Левченко, А. С. Керженцев**
О концепции «управляемой эволюции»
как альтернативе концепции «устойчивого развития» 4
- Т. А. Адамович, Т. Я. Ашихмина, Г. Я. Кантор**
Использование различных комбинаций
спектральных каналов космических снимков спутника
Landsat 8 для оценки природных сред и объектов (обзор) 9

МЕТОДОЛОГИЯ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ. МОДЕЛИ И ПРОГНОЗЫ

- А. С. Керженцев, В. Е. Остроумов** Оценка скорости
континентального осадконакопления при формировании
белгородской почвенно-осадочной последовательности 19
- Н. В. Коломыйцев, Б. И. Корженевский** Загрязнение и очищение
водотоков и водосборных территорий вследствие эрозии 24
- Б. К. Сон, К. Ю. Хан** Дизайн почвенных агрегатов: принципы
создания и характеристика их экологической устойчивости 29
- С. А. Тобратов** Интегральный параметр критических
нагрузок как основа экологического нормирования
загрязнения ландшафтов тяжёлыми металлами 33
- О. И. Худяков, О. В. Реиоткин** Эволюция почв
в связи с современным потеплением климата 38

МОНИТОРИНГ АНТРОПОГЕННЫХ И НАРУШЕННЫХ ТЕРРИТОРИЙ

- Н. Н. Зеленская** Отклик целостной экосистемы
на потепление климата 44
- А. В. Лупачёв, Н. Ф. Деева, Д. Ю. Аладин,
С. М. Севостьянов, Д. В. Дёмин** Анализ загрязнения
нефтепродуктами и хлорорганическими соединениями почв
и грунтов в окрестностях российских антарктических станций 49
- Ю. А. Мажайский, Т. М. Гусева** Мониторинг тяжёлых металлов
в экосистеме малой реки Окского бассейна 54
- Е. А. Зацаринная, А. П. Круглова** Изменчивость
антибиотикорезистентности общих колиформных бактерий,
выделенных из реки-приёмника очищенных сточных вод 59
- Д. Ю. Аладин, Н. Ф. Деева, С. М. Севостьянов, Д. В. Дёмин**
Влияние микрорельефа на распределение
полихлорбифенилов в почвах 64
- Н. П. Чижикова, Е. М. Коробова, В. Г. Линник,
Е. С. Четко** Функциональная значимость петрографо-
минералогического состава аллювиальных почв в распределении
и миграции радионуклидов в речных бассейнах 71

АГРОЭКОЛОГИЯ

- А. К. Квиткина, А. А. Ларионова, Д. М. Дударева, С. С. Быховец**
Влияние соотношения C:N на разложение фитомассы кукурузы
при изменении содержания эндогенного и экзогенного азота 78
- В. Ф. Хлебников, Н. В. Смурова** Эколого-генетический
анализ морфометрических признаков семени
Cucurbita pepo var. *giramontia* Duch. 83

ЭКОЛОГИЗАЦИЯ ПРОИЗВОДСТВА

- Г. А. Булаткин, Г. В. Митенко, И. Д. Гурьев** Альтернативная
энергетика: новые ресурсы биотоплива из растительного сырья 88

ЭКОТОКСИКОЛОГИЯ

- О. В. Зайцева, С. М. Севостьянов, Д. В. Дёмин** Оценка
токсичности регулятора роста растений на почвенных
беспозвоночных *Eisenia fetida* и гидробионтов *Daphnia magna* 93
- А. А. Широких, Д. В. Попыванов, И. Г. Широких**
Биосорбция Pb(II), Zn(II) и Cu(II) из водных растворов
мицелием *Trametes versicolor* 98
- С. Г. Скугорева, Т. Я. Ашихмина, А. К. Эсаулова,
А. И. Фокина** Влияние цеолита и гидрофосфата натрия
на биоаккумуляцию цинка и кобальта (II) растениями ячменя 105

- Ю. Л. Ткаченко** О возможности применения искусственных
экосистем для обеспечения жизнедеятельности человека 114

CONTENTS

THEORETICAL PROBLEMS OF ECOLOGY	<p>A. V. Yablokov, V. F. Levchenko, A. S. Kerzhentsev The conception of “controlled evolution” as an alternative to the conception of “sustainable development” 4</p> <p>T. A. Adamovich, T. Ya. Ashikhmina, G. Ya. Kantor Use of various combinations of spectral channels of satellite images from the Landsat 8 satellite for an assessment of natural environments and objects (review) 9</p>
METHODOLOGY AND RESEARCH METHODS. MODELS AND FORECASTS	<p>A. S. Kerzhentsev, V. E. Ostroumov Estimation of the continental sedimentation rate in the Belgorod soil-sediment sequence 19</p> <p>N. V. Kolomiitsev, B. I. Korzhenevskiy Contamination and purifying of water streams and landscapes due to erosion 24</p> <p>B. K. Son, K. Yu. Khan Design of soil aggregates: the principles of creation and their environmental sustainability 29</p> <p>S. A. Tobratov Integral parameter of critical loads as a basis for environmental regulation of landscapes contamination with heavy metals 33</p> <p>O. I. Khudyakov, O. V. Reshotkin Soil evolution in relation to modern climate warming 38</p>
MONITORING OF ANTHROPOGENICALLY DISTURBED AREAS	<p>N. N. Zelenskaya The response of holistic ecosystem to climate warming 44</p> <p>A. V. Lupachev, N. Ph. Deeva, D. Y. Aladin, S. M. Sevostyanov, D. V. Demin Analysis of pollution with oil products and organochlorines of soils in the vicinity of Russian Antarctic stations 49</p> <p>U. A. Mazhaysky, T. M. Guseva Monitoring of heavy metals in the ecosystem of a small river of the Oka Basin 54</p> <p>E. A. Zatsarinnaya, A. P. Kruglova, E. S. Efremova Variability of antibiotic resistance of total coliform bacteria isolated from the river that is a receiver of treated wastewater 59</p> <p>D. Yu. Aladin, N. Ph. Deeva, S. M. Sevostyanov, D. V. Demin The impact of microrelief on the distribution of polychlorinated biphenyls in soils 64</p> <p>N. P. Chizhikova, E. M. Korobova, V. G. Linnik, E. S. Chechetko The functional significance of petrographic and mineralogical composition of alluvial soil in distribution and migration of radionuclides in river basins 71</p>
AGROECOLOGY	<p>A. K. Kvitkina, A. A. Larionova, D. M. Dudareva, S. S. Byhovets Effect of C:N ratio and external and internal nitrogen on mineralization rate of corn residues 78</p> <p>V. F. Khlebnikov, N. V. Smurova Ecologic and genetic analysis of morphometric features of seeds of <i>Cucurbita pepo</i> var. <i>giramontia</i> Duch. 83</p>
ECOLOGIZATION OF PRODUCTION	<p>G. A. Bulatkin, G. V. Mitenko, I. D. Guriev Alternative power engineering: new resources vegetation materials 88</p>
ECOTOXICOLOGY	<p>O. V. Zaytseva, S. M. Sevostyanov, D. V. Demin Evaluation of the toxicity of plant growth regulator on soil invertebrates <i>Eisenia fetida</i> and aquatic <i>Daphnia magna</i> 93</p> <p>A. A. Shirokikh, D. V. Popivanov, I. G. Shirokikh Biosorption of Pb(II), Zn(II) and Cu(II) from aqueous solutions by <i>Trametes versicolor</i> mycelium 98</p> <p>S. G. Skugoreva, T. Ya. Ashikhmina, A. K. Esaulova, A. I. Fokina Effect of zeolite and sodium hydrogenphosphate on the bioaccumulation of zinc and cobalt(II) by barley plants 105</p>
SOCIAL ECOLOGY	<p>Y. L. Tkachenko On the possibility of using artificial ecosystems for maintenance of human life 114</p>

О концепции «управляемой эволюции» как альтернативе концепции «устойчивого развития»

© 2017. **А. В. Яблоков**¹, д. б. н., член-корр. РАН,
В. Ф. Левченко², д. б. н., зав. лабораторией,
А. С. Керженцев³, д. б. н., профессор, гл. н. с.,

¹ Институт биологии развития им. Н. К. Кольцова РАН,
119334, Россия, г. Москва, ул. Вавилова, 26,

² Институт эволюционной физиологии и биохимии им. И. М. Сеченова РАН,
194223, Россия, г. Санкт-Петербург, проспект Тореза, 44,

³ Институт фундаментальных проблем биологии РАН,
142290, Россия, Московская обл., г. Пушкино, ул. Институтская, 2,
e-mail: vflem@mail.wplus.net, kerzhent@rambler.ru

Концепция кризисного управления или управляемой эволюции является альтернативой популярной, но бесперспективной концепции устойчивого развития. Возникновение человека привело к превращению биосферы в антропосферу, размыканию замкнутых круговоротов вещества и нарушению биотической регуляции биосферных процессов. Человек, выйдя за рамки биологических закономерностей, расширил свою экологическую нишу за счёт освоения ресурсов, недоступных другим видам, создал новый класс веществ – третичную продукцию, включающую искусственные вещества и материалы, машины и механизмы, здания и сооружения, отходы производства и потребления, бытовые отходы. Эта продукция накапливается в биосфере, поскольку природные редуценты не справляются с её утилизацией; она извлекает из биосферы и консервирует биофильные элементы и создает очаги загрязнения среды обитания человека. Нарушение биотической регуляции и загрязнение биосферы глобальными и вечными поллютантами, ставит под угрозу жизнеобеспечивающие системы биосферы, несёт угрозу существованию самого человека из-за роста популяционного груза. Гармонизация этих процессов, необходимая для перехода антропосферы в ноосферу затруднена разницей в скоростях эволюции технологий, сознания и экосистем. Восстановить нарушенный гомеостаз невозможно при нарастании активности человека. Необходимо создать новый уровень гомеостаза с учётом численности и потребности современных консументов. Концепция кризисного управления развитием биосферы («управляемая эволюция») могла бы способствовать восстановлению гомеостаза биосферы, но для этого необходим отказ от неолитической парадигмы природопользования.

Ключевые слова: биосфера, антропосфера, ноосфера, управляемая эволюция, устойчивое развитие, гомеостаз, популяционный груз, биотическая регуляция.

The conception of “controlled evolution” as an alternative to the conception of “sustainable development”

A. V. Yablokov¹, **V. F. Levchenko**², **A. S. Kerzhentsev**³,

¹ Koltzov Institute of Developmental Biology RAS,
26 Vavilov St., Moscow, Russia, 119334,

² Sechenov Institute of Evolutionary Physiology and Biochemistry RAS,
44 Toreza St., Saint-Petersburg, Russia, 194223,

³ Institute of Basic Biological Problems RAS,
2 Institutskaya St., Pushchino, Moscow region, Russia, 142290,
e-mail: vflem@mail.wplus.net, kerzhent@rambler.ru

The concept of crisis management or “managed evolution” is an alternative to the popular but ineffective concept of “sustainable development”. The emergence of humans resulted in transformation of the biosphere into the anthroposphere associated with disrupting the closed circuits of matter circulation in the biosphere and of biotic regulation biosphere-wide processes. Humankind has surpassed the limits of biological regularities of evolution dynamics, expanded its ecological niche by making use of resources unavailable to other species, and created a novel class of matter – the

tertiary produce, including artificial matter, machines and mechanisms, buildings, industry and consumption wastes, residential wastes. These products accumulate in the biosphere as the natural reducers are not able to cope with their disposal. They extract biophile elements from the biosphere and create source areas of polluting the human environment. The disruption of the biotic regulation and the pollution of the biosphere with global non-degradable pollutants threaten the vital systems of the biosphere and the existence of humankind, in particular, because of the increasing population load. A harmonization of the process that currently take place on the planet is essential for the transformation of the biosphere into the noosphere; however, it is complicated by differences in the rates of evolution of ecosystems, technologies, and human mentality. It is not possible to restore the homeostasis in conditions of growing human activity. It is necessary to create a new level of homeostasis taking into account the number and the needs of the contemporary consumers. The concept of the emergency management of the biosphere ("manageable evolution") could help to restore the homeostasis of the biosphere treated as an integral organism. For that, however, the currently dominating Neolithic paradigm of nature management has to be refuted.

Keywords: biosphere, anthroposphere, noosphere, manageable evolution, sustainable development, homeostasis, population load, biotic regulation.

Сегодня можно утверждать, что концепция устойчивого развития оказалась невыполнимой. Ни одна страна так и не пошла по этому пути. Возникшая как реакция мирового бизнеса на распространение концепции устойчивого развития (далее – УР) для либерализации мировой торговли, Всемирная торговая организация оказалась много эффективнее.

С другой стороны, начиная с 1980-х гг. получает все большее признание идея и практика «кризисного управления» – исправления происшедших под влиянием человека изменений жизнеобеспечивающих свойств биосферы. В 2014 г. на основе идеологии кризисного управления А. В. Яблоковым, В. Ф. Левченко и А. С. Керженцевым была сформулирована концепция перехода к управляемой эволюции биосферы, как пути решения проблемы глобального экологического кризиса [1].

Три направления действий по восстановлению нарушенного человеком гомеостаза биосферы. Цикл метаболизма биосферы в антропоцене оказался существенно нарушенным не только из-за непосредственного разрушения естественных экосистем человеком, но также и по причине накопления третичной, т. е. антропогенной продукции, не утилизируемой природными редуцентами. Эта продукция возникла в результате использования человеком минерального сырья для изготовления на его основе материалов, изделий и сооружений. В антропосфере стало накапливаться огромное количество не утилизируемых отходов [2]. Естественные организмы-редуценты оказались не способными утилизировать эти отходы эволюционно неизвестного им состава. Производство третичной антропогенной продукции приводит, в том числе, к необратимому изъятию из глобального биосферного круговорота биофильных веществ и, соответственно, снижению первичной продукции фитомассы,

т. е. нарушению «расходной части» биологического круговорота биосферы.

Теоретически возможны три направления для восстановления нарушенного в антропоцене метаболизма биосферы.

Первое направление – *увеличение производства первичной продукции*. Один из путей для этого – увеличение плотности зелёного покрова планеты. В этом же ряду технологий (направленных на то, чтобы солнечный луч не падал на голую землю) находится развитие пермакультуры и агролесоводства.

В этом же направлении увеличения первичной продукции биосферы может оказаться перспективным повышение эффективности использования растениями энергии Солнца. Обычно растения используют на образование первичной продукции с помощью фотосинтеза не более 10% от поглощённой солнечной энергии. Существует теоретическая возможность несколько увеличить эту эффективность у некоторых растений, как путём увеличения содержания хлорофилла в фотосинтезирующих органах (с помощью селекции и генной инженерии), так и путём конструирования искусственных экосистем, увеличивая в них долю видов растений с высокой первичной продуктивностью.

Второе направление – *снижение «пресса консументов»*.

Чрезвычайно быстрый рост численности популяций человека и сопутствующих ему животных создал избыток вторичной продукции (зоомассы). Повышение выхода животного белка на единицу корма могло бы помочь уменьшить число сельскохозяйственных животных при той же общей продукции.

Третье направление – *снижение промышленного производства на основе традиционных технологий, использование новых, экологически-дружественных технологий и утилизация третичной продукции*.

Для сокращения третичной антропогенной продукции необходимо научиться возвращать захваченные антропосферой биофильные элементы в цикл метаболизма естественных и аграрных экосистем. Трудно разлагаемые и чуждые биоте «лишние» вещества следует каким-то образом концентрировать и безопасно захоранивать (по аналогии с естественным процессом биоминерализации, надолго выводящей из биосферного круговорота некоторые вещества).

Понятно, что любая деятельность, связанная с использованием материальных ресурсов, должна осуществляться на основе реализации так называемых каскадных технологий [3]: использование отходов одного предприятия в качестве сырья для другого и увеличение эффективности использования вовлекаемой в производство энергии. В конце каскада производства должна быть «зелёная лужайка», в глубине которой где-то находится надёжно изолированная кучка «лишних» не утилизируемых отходов (т. е. «выход в геологию», по Вернадскому).

Успех восстановления нарушенного в антропоцене гомеостаза биосферы зависит от двух позиций: хватит ли у человека времени и мудрости (политической воли) для отхода от неолитической парадигмы эксплуатации природы и от того, сколько и каких «точек невозврата» уже пройдено.

Возможные направления действий по стабилизации жизнеобеспечивающих свойств биосферы. Кроме восстановления нарушенного метаболизма биосферы, для устойчивого существования человечества в будущем важно обеспечить поддержание *жизнеобеспечивающих* свойств биосферы, необходимых в том числе и самому человеку. Этот антропоцентрический подход включает действия по восстановлению и поддержанию, по меньшей мере, трёх взаимосвязанных функций биосферы:

- 1) *средообразующих* (поддержание физико-химических свойств природной среды);
- 2) *биопродукционных* (в первую очередь, обеспечение человека пищей);
- 3) *биоинформационных* (обеспечение эстетических и поддерживающих развитие культуры).

Все жизнеобеспечивающие функции биосферы к настоящему времени оказались нарушенными:

- деградацией естественной среды и резким снижением биоразнообразия (в том числе уменьшением числа видов, уменьшением чис-

ленности и сокращением ареалов множества видов, расширением ареалов и увеличением численности синантропных видов);

- сокращением площадей и снижением биомассы природных экосистем;
- нарушением структуры и динамики развития биогеоценозов и их территориальных объединений, вплоть до биомов;
- расширением техносферы в виде увеличения «запечатанных» (покрытых бетоном, асфальтом, зданиями) площадей и распространением различных поллютантов.

Поскольку наши знания о природных процессах всегда ограничены существующим уровнем науки, методология восстановления нарушенных жизнеобеспечивающих функций биосферы может быть основана на максиме «природа знает лучше» [4]. Исходя из этого принципа, человек может рассчитывать на то, что природа сама исправит нарушенное, если дать ей возможность это сделать.

Соответственно этому, среди необходимых для существования человека действий по сохранению и стабилизации жизнеобеспечивающих функций биосферы можно назвать следующие:

- увеличение площади природных экосистем, увеличение природной биомассы;
- стабилизация уровня и восстановление биоразнообразия (поддержание на безопасном уровне численности находящихся под угрозой видов и биогеоценозов, а также контроль численности синантропных видов);
- восстановление структуры нарушенных биомов;
- деурбанизация «запечатанных» территорий;
- снижение популяционного груза.

Рассмотрим подробнее эти пять направлений.

Увеличение площади природных экосистем. Количественные расчёты по необходимому размеру охраняемых территорий для восстановления нарушенной биотической регуляции в биосфере должны содержать оценки площадей естественных природных территорий по всем биомам. Ориентировочная оценка предполагает, что площадь природных систем, минимально необходимая для поддержания жизнеобеспечивающих свойств биосферы, должна быть не меньше 50% поверхности суши [5, 6]. При этом надо исходить не из площадей административно-политических единиц, а площадей биомов и водосборных бассейнов.

Биомный принцип заключается в учёте относительной роли разных биомов в биотиче-

ской регуляции процессов в биосфере. Из этого подхода следует, что площади охраняемых территорий в высоких широтах должны быть многократно большими, нежели в тропиках.

Бассейновый подход также подразумевает сохранение экосистем с учётом их положения на водосборных территориях [7].

Для применения этих подходов и принципов нужны расчёты пределов допустимой трансформации различных экосистем, чего пока в должном объёме не сделано. По ориентировочным расчётам [5, 6, 8], восстановление природных экосистем на 50% территории суши позволит приостановить глобальные негативные изменения круговорота углерода и накопления углекислого газа в атмосфере даже при сохранении современных антропогенных выбросов.

Восстановление и сохранение биоразнообразия. Поскольку большая часть видов и биогеоценозов до сих пор не описана, то единственным способом надёжного сохранения биоразнообразия является сохранение в каждом биоме значительных участков в природном (нетронутым) состоянии. Это означает переход от видового принципа сохранения биоразнообразия, основанного на описании и сохранении отдельных видов, к экосистемно-биосферному принципу сохранения биоразнообразия, основанному на сохранении биогеоценозов и биомов.

Как бы фантастически это ни звучало, но сохранение биологических образцов тканей (в первую очередь – генетического материала) всех видов, обитающих на определённой территории, должно стать обязательным условием при осуществлении антропогенной трансформации любой территории.

Восстановление структуры нарушенных биомов. Ясно, что разные биомы имеют существенно разное значение в поддержании глобального экологического равновесия. Единица площади, занятая тропическими лесами и болотами, по продуктивности соответствует четырём единицам площади, занятой сходными экосистемами в умеренной зоне [5].

Деурбанизация. Уже десятилетия назад стало понятно [9], что надо стремиться к экологически упорядоченному использованию пространства городов. Практика их застройки требует существенной корректировки. Возникшая в последние десятилетия концепция «умных городов» частично решает эту задачу.

Снижение популяционного груза. Жизненно важным для человека становится проблема предотвращения дальнейшего роста

популяционного груза путём ограничения выбросов и сбросов загрязняющих биосферу веществ, очистки антропосферы от уже имеющихся в ней «вечных» поллютантов, лечением и медико-генетическим консультированием [10].

Успех вышеописанной и постоянно развивающейся программы действий будет зависеть от того, хватит ли у человека времени, не приведёт ли накопление популяционного груза к необратимому разрушению здоровья человека до того, как он окажется в состоянии наладить процессы в биосфере и своё жизнеобеспечение.

Обсуждение

Выше кратко были изложены идеи, которые суммарно составляют основу реализации концепции «управляемой эволюции» биосферы. В других работах авторов [10, 11] более подробно рассмотрены пути эволюции биосферы, структурно-функциональные особенности биосферы, основные черты глобального экологического кризиса и обсуждаются некоторые проблемы, связанные с выходом человека за пределы действия законов биологической эволюции.

Ниже приведены некоторые из важнейших постулатов, положенных в основу концепции управляемой эволюции:

- эволюция биосферы привела к созданию устойчивой к астрофизическим и теллурическим нарушениям совершенной системы биотической регуляции, основанной на высокой степени замкнутости всех природных круговоротов;
- возникновение и развитие человека, как существа биосоциального, вышедшего за рамки биологических закономерностей, разорвало эти замкнутые циклы и катастрофически нарушило биотическую регуляцию биосферы. Устойчивая биосфера превратилась в неустойчивую антропосферу;
- в результате существенного нарушения биотической регуляции разразился глобальный экологический кризис, который бумерангом начинает опасно затрагивать самого человека;
- преодоление экологического кризиса возможно с помощью управляемой эволюции (концепция кризисного управления развитием биосферы по существу альтернативна большинству подходов, предлагаемых в рамках концепции «устойчивого развития» [12]);
- такое преодоление возможно лишь путём восстановления нарушенной биотической

регуляции, на основе перехода от развития социума по неолитической парадигме эксплуатации и «покорения» природы к организации «кризисного управления» биосферной деятельностью социума – восстановлению и «ремонту» нарушенных процессов в биосфере;

– если деструктивная деятельность людей ещё не привела к переходу через «точку невозврата» (что неясно), то с помощью концепции управляемой эволюции будет возможным создание устойчивой антропосферы; это будет означать превращение антропосферы в *ноосферу*.

Литература

1. Яблоков А.В., Левченко В.Ф., Керженцев А.С. Переход к управляемой эволюции биосферы // Наука в России. 2014. № 4. С. 49–54.
2. Керженцев А.С. Функциональная экология. М.: Наука, 2006. 259 с.
3. Реймерс Н.Ф. Экология. Теории, законы, правила, принципы и гипотезы. М.: Россия молодая, 1994. 366 с.
4. Commoner B. The closing circle: nature, man, and technology. New York: Knopf, 1971. 326 p.
5. Горшков В.Г. Физические и биологические основы устойчивости жизни. М.: ВИНТИ, 1995. Т. XXVIII. 472 с.
6. Wilson E.O. Half-Earth: our planet's fight for life. N.-Y.: Liveright, 2016. 272 p.
7. Ковда В.А., Керженцев А.С. Экологический мониторинг: концепция, принципы организации // Региональный экологический мониторинг. М.: Наука, 1983. С. 7–14.
8. Горшков С.П. Стихийные бедствия, природа и человек // Природопользование и устойчивое развитие. М.: Товарищество научных изданий КМК, 2006. С. 106–134.
9. Родоман Б.Б. Поляризованная биосфера. Принцип размещения человеческих поселений с минимальным ущербом для окружающей природы // Городская среда и пути её оптимизации. М.: Изд-во АН СССР, 1977. С. 193–205.
10. Яблоков А.В. О концепции популяционного груза (обзор) // Гигиена и санитария. 2015. № 6. С. 11–15.
11. Яблоков А.В., Левченко В.Ф., Керженцев А.С. Очерки биосферологии. 1. Выход есть: переход к управ-

ляемой эволюции биосферы // Философия и космология. 2015. Т. 14. С. 91–117.

12. Урсул А.Д. На пути к праву устойчивого развития: концептуальные проблемы // Теоретическая и прикладная экология. 2008. № 1. С. 20–31.

References

1. Yablokov A.V., Levchenko V.F., Kerzhentsev A.S. The transition directed evolution of the biosphere // Nauka v Rossii. 2014. № 4. P. 49–54 (in Russian).
2. Kerzhentsev A.S. Functional ecology. M.: Nauka, 2006. 259 p. (in Russian).
3. Reimers N.F. Ecology. Theory, laws, rules, principles and hypotheses. M.: Rossiya molodaya, 1994. 366 p. (in Russian).
4. Commoner B. The closing circle: nature, man, and technology. New York: Knopf, 1971. 326 p.
5. Gorshkov V.G. Physical and biological bases of life stability. M.: VINITI, 1995. Vol. XXVIII. 472 p. (in Russian).
6. Wilson E.O. Half-Earth: our planet's fight for life. N.-Y.: Liveright, 2016. 272 p.
7. Kovda V.A., Kerzhentsev A.S. Environmental monitoring: concept, principles of the organization // Regional environmental monitoring. M.: Nauka, 1983. P. 7–14 (in Russian).
8. Gorshkov S.P. Disasters, nature and people // Environmental management and sustainable development. M.: Partnership of scientific publications KMK, 2006. P. 106–134 (in Russian).
9. Rodoman B.B. Polarized biosphere. The principle of placing human settlements with minimal damage to the environment // The urban environment and ways of its optimization. M.: Izd-vo AN SSSR, 1977. P. 193–205 (in Russian).
10. Yablokov A.V. On the concept of population load (review) // Hygiene and sanitation. 2015. № 6. P. 11–15 (in Russian).
11. Yablokov A.V., Levchenko V.F., Kerzhentsev A.S. Essays of biospherology. 1. There is a solution: go to the directed evolution of the biosphere // Philosophy & Cosmology. 2015. V. 14. P. 91–117 (in Russian).
12. Ursul A.D. towards a legislation of sustainable development: conceptual problems // Theoretical and Applied Ecology. 2008. № 1. P. 20–31 (in Russian).

Использование различных комбинаций спектральных каналов космических снимков спутника Landsat 8 для оценки природных сред и объектов (обзор)

© 2017. Т. А. Адамович¹, к. г. н., доцент,
Т. Я. Ашихмина^{1,2}, д. т. н., профессор, зав. лабораторией,
Г. Я. Кантор^{1,2}, к. т. н., научный сотрудник,

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

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

Программа дистанционного зондирования Земли из космоса Landsat начала свою работу в июле 1972 г. с запуска спутника Landsat 1 (США). В настоящее время на орбите работают два аппарата этой серии – Landsat 7 и Landsat 8. Landsat 7 близок к исчерпанию технического ресурса, поэтому основным источником актуальных космических снимков является спутник Landsat 8. Космические снимки, полученные со спутника Landsat 8, широко используются для решения научных и практических задач, связанных с оперативным спутниковым контролем природных ресурсов, исследованием динамики протекания природных процессов и явлений, анализом причин, прогнозированием возможных последствий и выбором способов предупреждения чрезвычайных ситуаций. По сравнению с предыдущими аппаратами серии спектральный диапазон аппаратуры Landsat 8 расширен за счёт двух новых каналов, которые позволяют проводить изучение водных объектов и аэрозолей.

Различные комбинации каналов видимого и ближнего инфракрасного излучения используются для решения большого числа тематических задач: классификация и анализ состояния растительного покрова; изучение сельскохозяйственных земель, водно-болотных угодий; анализ состояния водных объектов; классификация изменений в лесных массивах; картографирование таксационно-биометрических характеристик лесных насаждений; определение запасов древесных пород; картографирование почв; изучение динамики пожаров и пост-пожарного анализа территории. Комбинации различных каналов спутника Landsat 8 зависят от условий конкретной сцены (район, сезон съёмки и т. д.).

Возможности использования различных комбинаций спектральных каналов космических снимков спутника Landsat 8 в данной работе рассмотрены на примере двух участков территории Кировской области, различающихся по степени антропогенной нагрузки – Государственный природный заповедник «Нургуш» и областной центр Кировской области (г. Киров). Использование данного инструментария космических снимков позволяет выявлять различные характеристики природных экосистем на больших территориях без проведения дополнительных полевых исследований.

Ключевые слова: Landsat 8, комбинации каналов, многозональные космические снимки, природные объекты.

Use of various combinations of spectral channels of satellite images from the Landsat 8 satellite for an assessment of natural environments and objects (review)

T. A. Adamovich¹, T. Ya. Ashikhmina^{1,2}, G. Ya. Kantor^{1,2},

¹ Vyatka State University,

36 Moskovskaya St., Kirov, Russia, 610000,

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

28 Kommunisticheskaya St., Syktyvkar, Russia, 167982,

e-mail: ttjnadamvich@rambler.ru

The Landsat program of remote sensing of Earth from space has been started in July, 1972 with launch of the first Landsat satellite in USA. Now two space vehicles of this series – Landsat 7 and Landsat 8 work at their orbits. Landsat 7 is close to exhaustion of a technical resource therefore the main source of urgent imagery is the Landsat 8 satellite. The satellite images received from the Landsat 8 are widely used for the solution of the scientific and practical tasks related

to operational control of natural resources, a research of dynamics of natural processes and the phenomena, the analysis of the reasons, forecasting of possible consequences and the choice of ways of the prevention of emergency situations. In comparison with the previous devices of a series the spectral range of the Landsat 8 equipment is expanded at the expense of two new channels which allows to carry out studying of water objects and aerosols.

Various combinations of channels of visible and near infrared radiation are used for the solution of a large number of thematic tasks: classification and analysis of a condition of a vegetable cover; studying of farmlands, wetlands; analysis of a condition of water objects; classification of changes in forests; mapping of economic and biometric characteristics of forest plantings; definition of stocks of tree species; mapping of soils; studying of dynamics of the fires and post-fire analysis of the territory. Combination of various channels of the Landsat 8 satellite for research depends on conditions of a concrete scene (the area, a shooting season etc.).

The possibilities of use of various combinations of spectral channels of satellite imagery from the Landsat 8 satellite are considered in this paper on the example of two sites of the territory of the Kirov region differing on degree of anthropogenic load – the State Nature Reserve “Nurgush” and the administrative center of the Kirov region (city of Kirov). Use of these tools of satellite imagery allows revealing various characteristics of natural ecosystems in large territories without carrying out extra field researches.

Keywords: Landsat 8, combinations of channels, multispectral satellite images, natural objects.

Введение

В настоящее время на орбите находится более 100 космических аппаратов дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ), выполняющих съёмку в различных спектральных каналах и с разным разрешением, с высокой точностью, периодичностью и производительностью [1].

Программа Landsat – наиболее продолжительный проект по получению спутниковых фотоснимков планеты Земля [2]. Данные, получаемые при помощи Landsat, используются при решении большого числа тематических задач, включая измерение площади растительного покрова и его классификацию [3, 4], определение состояния сельскохозяйственных культур [5], геологическое картирование [6], контроль эрозии почв в береговой зоне и т. д.

Спутники серии Landsat являются важнейшим источником общедоступных спектрально-зональных космических снимков 30-метрового разрешения [7], широко используемых для тематического картографирования поверхности Земли и мониторинга различных природных процессов и объектов, в том числе лесов [8]. Снимки спутников этой серии внесли огромный вклад в развитие наук о Земле во всем мире, в частности в России.

Первый спутник серии Landsat (ERTS-1, Earth Resources Technology Satellite 1) был запущен на орбиту 23 июля 1972 г. в США [9]. Космические снимки с данного спутника имели разрешение 80 м, съёмка велась в 4 спектральных диапазонах. Предшественники Landsat 8 (4, 5, 7) поставляли снимки в 8 спектральных диапазонах с пространственным разрешением от 15 до 60 метров.

В настоящее время наиболее актуальные спутниковые данные можно получить

со спутника Landsat 8. Он был выведен на орбиту 11 февраля 2013 г. [10]. Его снимки имеют разрешение 30 м в 9 спектральных каналах, 7 из которых близки к тем, которые использовались в более ранних инструментах Thematic Mapper (TM) и Enhanced Thematic Mapper Plus (ETM+) на предыдущих спутниках Landsat [11, 12]. За счёт этого обеспечивается преемственность и совместимость с ранее накопленным массивом данных Landsat [13–15]. Два дополнительных спектральных канала позволяют проводить изучение водных объектов и аэрозолей [16].

Landsat 8 вращается вокруг Земли по гелиосинхронной орбите высотой 705 км, облетая Землю каждые 98,9 минут и пересекая экватор в десять часов утра. Вся поверхность Земли (за исключением полярных областей) покрывается снимками этого спутника каждые 16 дней [17, 18]. Спутник Landsat 8 получает данные, используя два набора инструментов: Operational Land Imager (OLI) и Thermal InfraRed Sensor (TIRS) [19, 20]. Первый набор получает изображения в 9 диапазонах видимого света и ближнего инфракрасного излучения (ИК), второй набор – в 2 диапазонах дальнего (теплого) ИК с разрешением 100 м (табл.). Спутник рассчитан на срок активного существования в течение 5,25 лет, однако запас топлива позволяет использовать его до 10 лет.

Канал 1 чувствителен к тёмно-синим и фиолетовым цветам. Синий цвет трудно различать из космоса, так как он хорошо рассеивается на пыли и частичках воды в воздухе, а также на самих молекулах воздуха. Этот диапазон также называется побережным или аэрозольным, согласно двум новым основным видам применения: в нём видно мелководье и мельчайшие частички пыли и дыма в воздухе [21].

Спектральные каналы спутника Landsat 8 OLI

№ канала	Название канала	Длины волн, мкм	Разрешение, м
1	побережья и аэрозоли	0,433–0,453	30
2	синий	0,450–0,515	30
3	зелёный	0,525–0,600	30
4	красный	0,630–0,680	30
5	ближний ИК	0,845–0,885	30
6	ближний ИК	1,560–1,660	30
7	ближний ИК	2,100–2,300	30
8	панхроматический	0,500–0,680	15
9	перистые облака	1,360–1,390	30
10	дальний ИК	10,30–11,30	100
11	дальний ИК	11,50–12,50	100

Каналы 2, 3 и 4 представляют собой видимые синий, зелёный и красный диапазоны.

Канал 5 измеряет ближний инфракрасный спектр. Он особенно важен для экологов, поскольку листья здоровых растений имеют высокий коэффициент отражения в этой части спектра. Данные с этого канала в сочетании с другими каналами используются для расчёта различных вегетационных индексов, например, NDVI (**N**ormalized **D**ifference **V**egetation **I**ndex – нормализованный разностный вегетационный индекс) [22]. Индексы данной группы позволяют проводить классификацию растительности и оценивать её состояние [23].

Каналы 6 и 7 покрывают разные участки коротковолнового инфракрасного диапазона. Они дают возможность отличить сухую землю от влажной, а также скалы и почвы [24], которые плохо различимы в других диапазонах, но хорошо – в инфракрасной области спектра.

Канал 8 – панхроматический. Он воспринимает больше света и даёт самую чёткую картинку среди всех диапазонов. Его разрешение составляет 15 метров.

Канал 9 – это одна из самых интересных особенностей Landsat 8. Он покрывает очень узкую полосу длин волн – 30 нанометров [25]. Немногие из космических инструментов регистрируют эту область спектра, так как она почти полностью поглощается атмосферой. Landsat 8 использует это как преимущество. Поскольку земля в этом диапазоне едва различима, значит всё, что в нём ярко видно, либо отражает очень хорошо, либо находится вне атмосферы. В 9-м канале видны только облака, которые представляют реальную проблему для спутниковых снимков, так как из-за размытых краёв плохо различимы в обычных диапазонах, а снимки, сделанные сквозь них,

могут иметь расхождения с другими. С помощью канала 9 это легко отследить.

Каналы 10 и 11 регистрируют тепловое инфракрасное излучение. Данные каналы позволяют измерять температуру поверхности Земли [26, 27].

Космические снимки, полученные со спутника Landsat 8, решают следующие научные и практические задачи [28]:

1) сбор и сохранение многоспектральных изображений среднего разрешения (30 м) не менее, чем в течение 5 лет;

2) сохранение геометрии, калибровки, покрытия, спектральных характеристик, качества изображений и доступности данных на уровне, аналогичном предыдущим спутникам программы Landsat.

Одним из преимуществ Landsat 8 является улучшенная геометрия снимков [10]. Данные из невидимых диапазонов спектра позволяют анализировать множество разных аспектов, начиная с типов поверхности, заканчивая ростом сельскохозяйственных культур и природными катастрофами по всему миру.

В данной работе для иллюстрации различных возможностей применения комбинаций спектральных каналов использовались снимки с космического аппарата Landsat 8 для двух участков на территории Кировской области, различающихся по степени антропогенной нагрузки – Государственный природный заповедник «Нургуш» и областной центр Кировской области (г. Киров). Для анализа объектов земной поверхности использовали различные комбинации спектральных каналов космических снимков, сделанных с аппарата Landsat 8 за июнь 2016 г. (территория заповедника «Нургуш») и август 2015 г. (территория города Кирова) (рис. 1–6, см. цв. вкладку). Обработку космических снимков проводили в программе

ENVI 5.2 [29]. Особенностью программного комплекса ENVI является то, что для визуализации многоспектрального космического снимка можно использовать три любых спектральных канала, отобразив их в основных цветах монитора – красном, зелёном и синем (RGB). Например, комбинация каналов 5-6-2 означает, что ближний ИК-диапазон (0,845–0,885 мкм) отображается на экране красным цветом, диапазон 1,560–1,660 мкм – зелёным, а видимый диапазон 0,450–0,515 мкм – синим.

Характеристика комбинаций каналов спутника Landsat 8

Комбинация каналов 5-4-3

Это стандартная комбинация, которая носит название «искусственные цвета» (рис. 1, цв. вкладка). Растительность отображается в оттенках красного, городская застройка – зелёно-голубых, а цвет почвы варьируется от тёмно- до светло-коричневого. Лёд, снег и облака выглядят белыми или светло-голубыми. Хвойные леса будут выглядеть более тёмно-красными или даже коричневыми по сравнению с лиственными лесами. В целом, насыщенные оттенки красного являются индикаторами здоровой и (или) широколиственной растительности, в то время как более светлые оттенки характеризуют травянистую или редколесья и кустарниковую растительность. Эта комбинация очень популярна и используется, в основном, для изучения состояния растительного покрова, в частности, для мониторинга биоразнообразия лесов [30]. Кроме того, данное сочетание каналов позволяет проводить мониторинг дренажа и почвенной мозаики [31]. Интересна данная комбинация для исследования сезонной динамики спектрально-отражательных свойств агрокультур [32].

Комбинация каналов 4-3-2

Данная комбинация называется «естественные цвета» (рис. 2, цв. вкладка). Здесь используются каналы видимого диапазона, поэтому объекты земной поверхности выглядят похожими на то, как они воспринимаются человеческим глазом. Здоровая растительность выглядит зелёной, убранные поля – светлыми, угнетённая растительность – коричневой и жёлтой, дороги – серыми, береговые линии – белёсыми. Эта комбинация каналов даёт возможность анализировать состояние водных объектов [33, 34] и процессы седиментации, оценивать глубины. Такое сочетание каналов

позволяет изучать антропогенные объекты [35, 36]. Недостатками данной комбинации является плохое детектирование вырубок и разреженной растительности, трудное отделение одного типа растительности от другого. Кроме того, такое сочетание каналов не позволяет отличить мелководье от почв.

Комбинация каналов 7-5-3

Такая комбинация даёт изображение близкое к естественным цветам, но в то же время позволяет анализировать состояние атмосферы и дым (рис. 3, цв. вкладка). Здоровая растительность выглядит ярко-зелёной, травянистые сообщества – зелёными, ярко-розовые участки детектируют открытую почву, коричневые и оранжевые тона характерны для разреженной растительности. Сухостойная растительность выглядит оранжевой, вода – голубой.

Песок, почва и минералы могут быть представлены очень большим числом цветов и оттенков. Эта комбинация даёт хороший результат при анализе пустынь и опустыненных территорий [37]. Кроме того, может быть использована для изучения сельскохозяйственных земель [38] и водно-болотных угодий [39]. Эта комбинация используется для изучения динамики пожаров и пост-пожарного анализа территории [40–42]. Выгоревшие территории будут выглядеть ярко-красными. Городская застройка отображается в оттенках розово-фиолетового, травянистые сообщества – зелёными и светло-зелёными. Светло-зелёные точки внутри городских территорий могут быть парками, садами. Оливково-зелёный цвет характерен для лесных массивов, а более тёмный цвет является индикатором примеси хвойных пород.

Комбинация каналов 5-6-2

При данном сочетании каналов здоровая растительность отображается в оттенках красного, коричневого, оранжевого и зелёного. Почвы могут выглядеть зелёными или коричневыми, урбанизированные территории – белёсыми, серыми и зелёно-голубыми, ярко-голубой цвет может детектировать недавно вырубленные территории [43], а красноватый цвет характеризует восстановление растительности или разреженную растительность. Чистая, глубокая вода будет выглядеть тёмно-синей (почти чёрной), если же это мелководье или в воде содержится большое количество взвесей, то в цвете будут преобладать более светло-синие оттенки. Данная комбинация

Т. А. Адамович, Т. Я. Ашихмина, Г. Я. Кантор
«Использование различных комбинаций спектральных каналов
космических снимков спутника Landsat 8 для оценки
природных сред и объектов (обзор)» (С. 9)

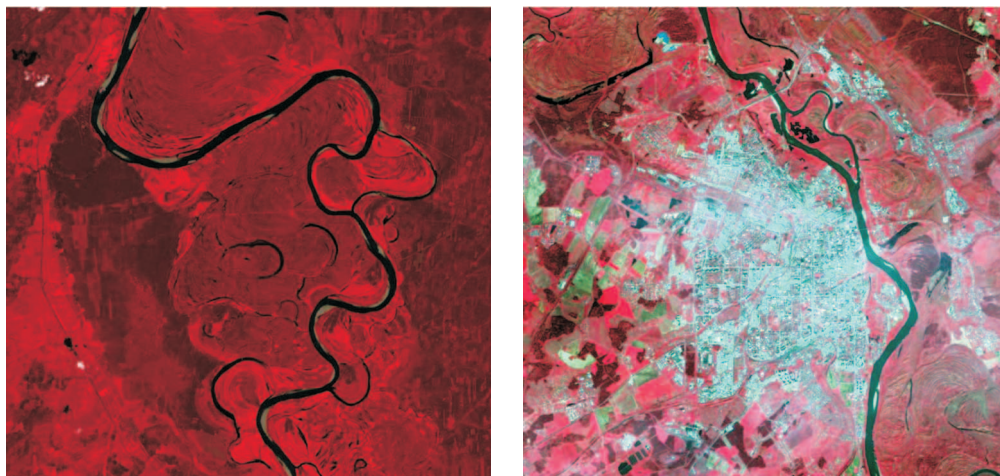


Рис. 1. Комбинация каналов 5-4-3: а) заповедник «Нургуш», б) город Киров



Рис. 2. Комбинация каналов 4-3-2: а) заповедник «Нургуш», б) город Киров

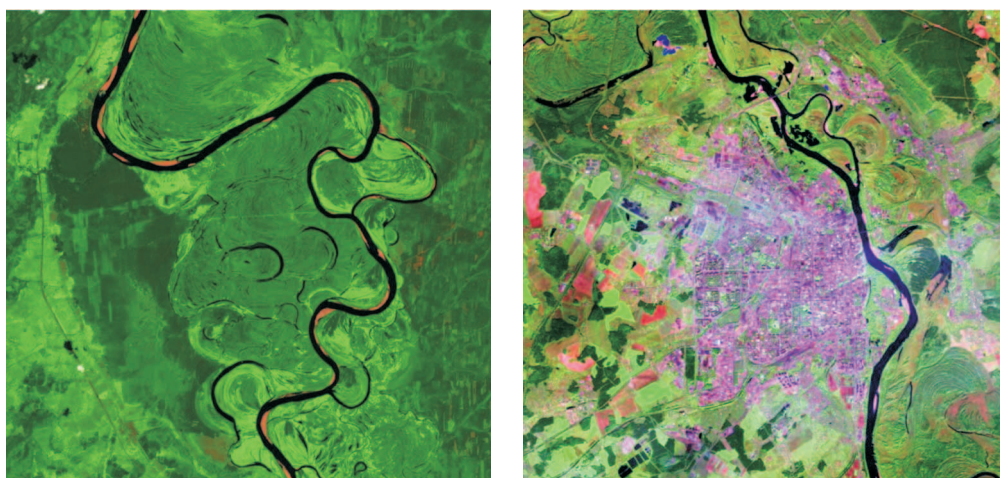


Рис. 3. Комбинация каналов 7-5-3: а) заповедник «Нургуш», б) город Киров

Т. А. Адамович, Т. Я. Ашихмина, Г. Я. Кантор
«Использование различных комбинаций спектральных каналов
космических снимков спутника Landsat 8 для оценки
природных сред и объектов (обзор)» (С. 9)

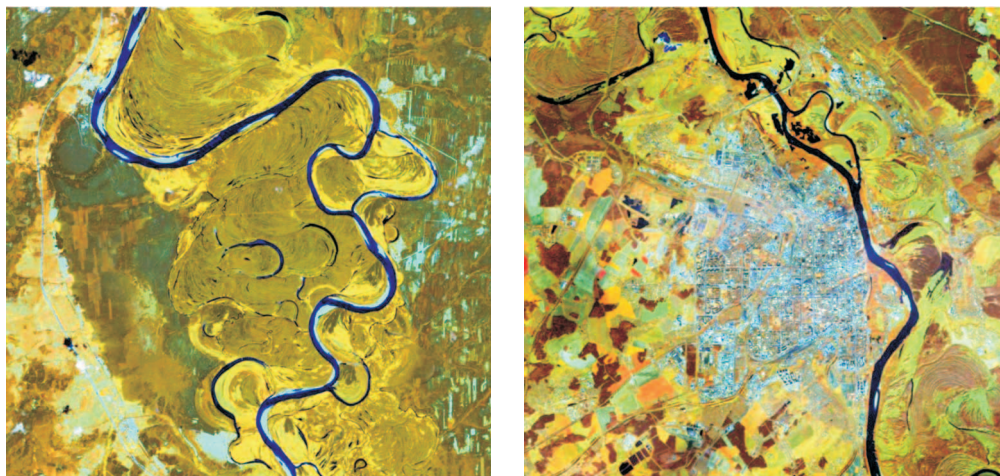


Рис. 4. Комбинация каналов 5-6-4: а) заповедник «Нургуш», б) город Киров



Рис. 5. Комбинация каналов 7-6-4: а) заповедник «Нургуш», б) город Киров

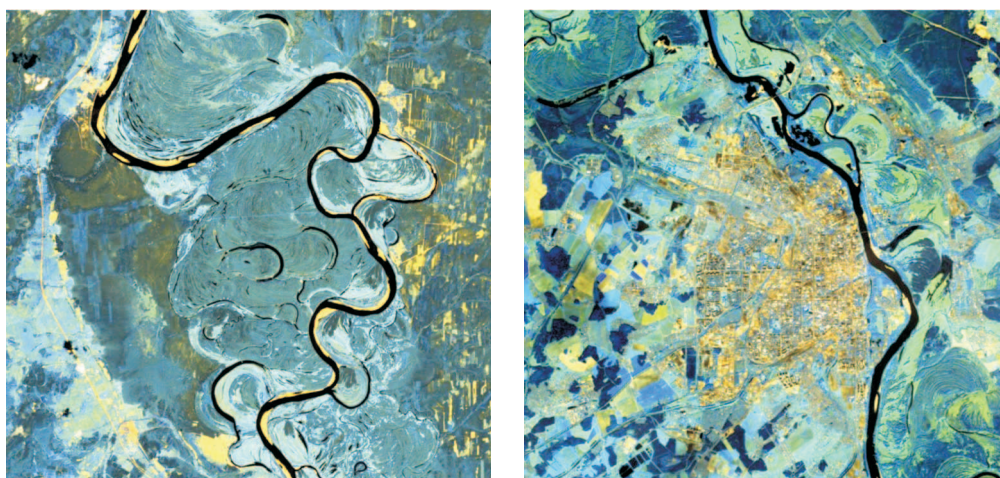


Рис. 6. Комбинация каналов 7-6-5: а) заповедник «Нургуш», б) город Киров

каналов может быть использована в оценке показателей мутности, цветности и содержания хлорофилла в воде [44]. Сочетание каналов позволяет детектировать здоровую растительность, почвы [45]. Добавление среднего инфракрасного канала позволяет добиться хорошей различимости возраста растительности.

Комбинация каналов 5-6-4

Эта комбинация ближнего, среднего ИК-каналов и красного видимого канала позволяет чётко различить границу между водой и суши и подчеркнуть скрытые детали, плохо видимые при использовании только каналов видимого диапазона (рис. 4, цв. вкладка). С большой точностью будут детектироваться водные объекты внутри суши [46, 47]. Комбинация позволяет анализировать влажность, она полезна при изучении почв и растительного покрова [48, 49].

Комбинация каналов 7-6-4

Данная комбинация даёт изображение близкое к естественным цветам (рис. 5, цв. вкладка). Растительность отображается в оттенках тёмно- и светло-зелёного, урбанизированные территории выглядят белыми, зелёно-голубыми и малиновыми, почвы, песок и минералы могут быть очень разных цветов. Практически полное поглощение излучения в среднем ИК-диапазоне водой, снегом и льдом позволяет очень чётко выделять береговую линию и подчеркнуть водные объекты на снимке. Горячие точки (как, например, кальдеры вулканов и пожары) выглядят красноватыми или жёлтыми [50]. Одно из возможных применений этой комбинации каналов – мониторинг пожаров [51].

Комбинация каналов 7-6-5

Комбинация не включает ни одного канала из видимого диапазона, и обеспечивает оптимальный анализ состояния атмосферы (рис. 6, цв. вкладка). Береговые линии чётко различимы. Такое сочетание каналов может быть использовано для анализа текстуры и влажности почв [52].

Заключение

Приведённый анализ сочетаний каналов позволяет понять, что при помощи космических снимков возможно выявление различных характеристик природных экосистем на больших территориях с меньшим объёмом полевых работ [53].

Таким образом, накопленные к настоящему времени архивы космических снимков со спутников Landsat, полученных бортовыми сенсорами TM и ETM, OLI и TIRS, открывают уникальную возможность использования космических снимков среднего пространственного разрешения для оперативного спутникового контроля природных ресурсов, исследования динамики протекания природных процессов и явлений, анализа причин, прогнозирования возможных последствий и выбора способов предупреждения чрезвычайных ситуаций [54]. Разрабатываются методы детектирования и классификации изменений в лесных массивах на основе анализа разновременных спутниковых данных Landsat. На основе материалов космической съёмки осуществляется картографирование таксационно-биометрических характеристик лесных насаждений [55], определение запасов древесных пород [56]. Кроме того, мультиспектральные космические снимки Landsat 8 позволяют выявлять особенности ландшафтов с целью создания карты элементов среды обитания охотничьих ресурсов [57]. В 2023 г. планируется вывод на орбиту спутника Landsat 9, который будет в основном копировать его предшественника [58].

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

Литература

1. Кашкин В.Б., Сухинин А.И. Дистанционное зондирование Земли из космоса. Цифровая обработка изображений. М.: Логос, 2001. 264 с.
2. Чандра А.М., Гош С.К. Дистанционное зондирование и географические информационные системы. Москва: Техносфера, 2008. 312 с.
3. Миклашевич Т.С., Барталев С.А. Метод определения фенологических характеристик растительного покрова на основе временных рядов спутниковых данных // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2016. Т. 13. № 1. С. 9–24.
4. Olsson H. A method for using Landsat time series for monitoring young plantations in boreal forests // International Journal of Remote Sensing. 2009. № 30 (19). P. 5117–5131.
5. Сидько А.Ф., Шевырнов А.П. Спектральная яркость растений, как основа дистанционной диагностики посевов сельскохозяйственных культур // ДАН. 1997. Т. 354. № 1. С. 120–122.

6. Журавель Ю.Н., Федосеев А.А. Эффективность использования мультиспектральных и гиперспектральных данных дистанционного зондирования в задачах мониторинга окружающей среды // Вестник Самарского государственного аэрокосмического университета. 2013. № 4 (42). С. 38–48.
7. Гарбук С.В., Гершензон В.Е. Космические системы дистанционного зондирования Земли. М.: Издательство А и Б, 1997. 296 с.
8. Воробьев О.Н., Курбанов Э.А., Полевщикова Ю.А., Лежнин С.А. Оценка динамики нарушенности лесного покрова в среднем Поволжье по снимкам Landsat // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2016. Т. 13. № 4. С. 124–134.
9. Smith J.A., Tzeu L.L., Ranson K.J. The lambertian assumption and Landsat data // Photogrammetric Engineering and Remote Sensing 1980. V. 46. P. 1183–1189.
10. Meyer P., Itten K.I., Kellenberger T., Sandmeier S., Sandmeier R. Radiometric corrections of topographically induced effects on Landsat TM data in an alpine environment // ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing. 1993. V. 48. P. 17–28.
11. Саворский В.П., Смирнов М.Т., Тищенко Ю.Г. Справочно-информационная система спутникового мониторинга Земли // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2006. Т. 3. № 1. С. 198–205.
12. Кошко А. А. Спутник дистанционного зондирования Земли Landsat 8 // Кадастр недвижимости и мониторинг природных ресурсов. Материалы международной научно-технической интернет-конференции.
13. Sharing Earth Observation Resources [Электронный ресурс]: <https://directory.eoportal.org/web/eoportal/satellite-missions/l/landsat-8-ldcm>. (Дата обращения 08.06.2017).
14. Roy D.P., Wulder M.A., Loveland T.R. Landsat-8: Science and product vision for terrestrial global change research // Remote Sensing of Environment. 2014. № 145. P. 154–172.
15. Прошин А.А., Лупян Е.А., Балашов И.В., Кашницкий А.В., Бурцев М.А. Создание унифицированной системы ведения архивов спутниковых данных, предназначенной для построения современных систем дистанционного мониторинга // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2016. Т. 13. № 3. С. 9–27.
16. Лупян Е.А., Балашов И.В., Бурцев М.А., Ефремов В.Ю., Мазуров А.А., Мальцев Д.В., Матвеев А.А., Прошин А.А., Топлин В.А., Халикова О.А., Крашениникова Ю.С. Возможности работы с долговременным архивом данных спутников Landsat по территории России и приграничных стран // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2012. Т. 9. № 3. С. 307–315.
17. Neil flood continuity of reflectance data between Landsat-ETM+ and Landsat-8 OLI, for both top-of-atmosphere and surface reflectance: A study in the Australian landscape // Remote Sens. 2014. № 6. P. 7952–7970.
18. Голицын Г.С., Руткевич Б.П., Руткевич П.Б. Нижняя граница облачности // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2006. Т. 3. № 1. С. 263–269.
19. Landsat 8 (L8) Data Users Handbook, L8DS-1574, version 1.0. Sioux Falls, USA: USGS EROS, 2015. 98 p.
20. James S., Choate M., Moe D. Landsat 8 thermal infrared sensor geometric characterization and calibration // Remote Sensing 6. 2014. № 11. P. 11153–11181.
21. Белова Е.И., Ершов Д.В. Методика создания безоблачных композитных изображений по спутниковым данным LANDSAT // Восьмая открытая Всероссийская конференция «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса: Физические основы, методы и технологии мониторинга окружающей среды, потенциально опасных явлений и объектов». 2010. С. 33–34.
22. Черепанов А.С. Вегетационные индексы: справочные материалы // Геоматика. 2011. № 2. С. 98–102.
23. 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. Сер. Химия. Биология. Экология. 2012. Т. 12. Вып. 2. С. 94–96.
24. Кравцова В.И. Космические методы исследования почв. М.: Аспект Пресс, 2005. 190 с.
25. Кондратенков Г.С., Фролов А.Ю. Радиовидение. Радиолокационные системы дистанционного зондирования Земли. Учебное пособие для вузов. М.: Радиотехника, 2005. 368 с.
26. Шовенгердт Р.А. Дистанционное зондирование. Модели и методы обработки изображений. М.: Техносфера, 2010. 560 с.
27. Гаркуша И.Н. Автоматизация процессов обработки космоснимков в задачах теплового картографирования городов // Зб. наук праць НГУ. Д.: Национальний горний університет. 2013. № 40. С. 114–120.
28. Адамович Т.А., Ашихмина Т.Я., Кантор Г.Я., Савиных В.П. Применение данных Landsat 8 при изучении природных комплексов // Экология родного края: проблемы и пути их решения: Материалы XII Всероссийской научно-практической конференции с международным участием. Книга 1. Киров: ВятГУ, 2017. С. 19–22.
29. Объединение многоканальных данных в единый файл в ENVI [Электронный ресурс]: **GIS-Lab Географические информационные системы и дистанционное зондирование**. Режим доступа: <http://gis-lab.info> (Дата обращения 08.06.2017).
30. Исаев А.С. Использование спутниковых данных для мониторинга биоразнообразия лесов // Исследования земли из космоса. 2009. № 2. С. 1–12.
31. Савин И.Ю., Симакова М.С. Спутниковые технологии для инвентаризации и мониторинга почв России // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2012. Т. 9. № 5. С. 104–115.

32. Беляев Б., Кизяк Е., Хрущева Е. Исследование сезонной динамики спектрально-отражательных свойств агрокультур Беларуси на основе полевого спектрометрирования и материалов дистанционного зондирования Земли // *Земля Беларуси*. 2016. № 2. С. 42–46.
33. Курганович К.А., Носкова Е.В. Использование водных индексов для оценки изменения площадей водного зеркала содовых озёр Юго-Востока Забайкалья по данным дистанционного зондирования // *Вестник ЗабГУ*. 2015. № 6 (121). С. 16–24.
34. Feyisa G.L., Meilby H., Fensholt R., Proud S.R. Automated water extraction index: A new technique for surface water mapping using Landsat imagery // *Remote Sensing of Environment*. 2014. № 140. P. 23–35.
35. Климанова О. А., Оспанов А. Е. Опыт использования карт региональных атласов и снимков Landsat-5, 7, 8 для анализа трансформации землепользования в Северном Казахстане в 1953–2015 гг. // *Известия высших учебных заведений. Геодезия и аэрофотосъёмка*. 2016. Т. 60. № 5. С. 13–19.
36. Корниенко С.Г. Оценка влияния разработки Уренгойского нефтегазоконденсатного месторождения на состояние территории лесотундры по данным ИСЗ Landsat // *Исследование Земли из космоса*. 2009. № 4. С. 78–87.
37. Цыдыпов Б.З., Миронов И.А., Куликов А.И. Выявление опустыненных территорий на основе комплексного анализа мультиспектральных (Landsat) и радарных (SRTM) спутниковых данных // *Вестник ИрГТУ*. 2012. № 4. С. 67–73.
38. Повх В.И., Гарбузов Г.П., Шляхова Л.А. Космический мониторинг сельскохозяйственных угодий Ростовской области // *Исследование Земли из космоса*. 2006. № 3. С. 89–96.
39. Мартынюк В.А. Мониторинг площадей озерно-болотных систем региона по материалам дистанционного зондирования Земли // *Мониторинг окружающей среды: сб. материалов II международной науч.-практ. конф. Брест: БрГУ, 2013. С. 118–121.*
40. Барталев С.А., Беляев А.И., Егоров В.А., Ершов Д.В., Коровин Г.Н., Коршунов Н.А., Котельников Р.В., Лупян Е.А. Валидация результатов выявления и оценки площадей, поврежденных пожарами лесов по данным спутникового мониторинга // *Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса: Физические основы, методы и технологии мониторинга окружающей среды, потенциально опасных объектов и явлений. Сборник научных статей. М.: GRANP polygraph, 2005. Т. 2. С. 343–353.*
41. Барталев С.А., Лупян Е.А., Стыценко Ф.В., Панова О.Ю., Ефремов В.Ю. Экспресс-картографирование повреждений лесов России пожарами по спутниковым данным Landsat // *Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса*. 2014. Т. 11. № 1. С. 9–20.
42. Loupian E.A., Mazurov A.A., Flitman E.V., Ershov D.V., Korovin G.N., Novik V.P., Abushenko N.A., Altyntsev D.A., Koshelev V.V., Tashchilin S.A., Tatarnikov A.V., Csiszar I., Sukhinin A.I., Ponomarev E.I., Afonin S.V., Belov V.V., Matvienko G.G., Loboda T.V. Satellite monitoring of forest fires in Russia at federal and regional levels // *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change*. 2006. № 11. P. 113–145.
43. Сидоренков В.М., Дорощенко Э.В., Жафяров А.В., Ильин Ф.С. Оценка потенциала различных видов рубок на основе анализа спутниковых данных Landsat-8 // *Лесотехнический журнал*. 2015. Т. 5. №1 (17). С. 97–109.
44. Тихомиров О.А., Бочаров А.В., Комиссаров А.Б., Хижняк С.Д., Пахомов П.М. Использование данных сенсора Landsat 8 (OLI) для оценки показателей мутности, цветности и содержания хлорофилла в воде Ивановского водохранилища // *Вестник Тверского государственного университета. Серия: Химия*. 2016. № 2. С.230–244.
45. Сборишук Ю.Н. Дистанционные методы инвентаризации и мониторинга почвенного покрова. М.: Изд-во МГУ, 1992. Ч. 1. 86 с.
46. Терехов А.Г., Пак И.Т., Долгих С.А. Данные Landsat 5, 7, 8 и WVN в задаче мониторинга гидрологического режима Капшагайского водохранилища на реке Текес (Китайская часть бассейна реки Иле) // *Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса*. 2015. Т. 12. № 6. С. 174–182.
47. Силкин К.Ю. Методика оценки экологического состояния Воронежского водохранилища по материалам многозонального дистанционного зондирования // *Вестник ВГУ. Серия: Геология*. 2012. № 1. С. 220–223.
48. Лаверов Н.П., Попович В.В., Ведешин Л.А., Гальяно Ф.Р. Методы анализа данных дистанционного зондирования Земли // *Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса*. 2015. Т. 12. № 6. С. 145–153.
49. Li S., Chen X. A new bare-soil index for rapid mapping developing areas using Landsat 8 data // *The international archives of the photogrammetry, remote sensing and spatial information sciences: ISPRS technical commission IV symposium. V. XL-4. Suzhou, China*. 2014. P. 139–144.
50. Горный В.И. Космические измерительные методы инфракрасного теплового диапазона при мониторинге потенциально опасных явлений и объектов // *Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса*. 2004. Т. 2. № 1. С. 10–16.
51. Куулар Х.Б. Оценка гарей Уюкского хребта на основе данных Landsat // *Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса*. 2013. Т. 10. № 4. С. 239–244.
52. Жиленев М.Ю. Обзор применения мультиспектральных данных ДЗЗ и их комбинаций при цифровой обработке // *Геоматика*. 2009. № 3. С. 56–64.
53. Евдокимов С.И., Михалап С.Г. Определение физического смысла комбинации каналов снимков Landsat

для мониторинга состояния наземных и водных экосистем // Вестник Псковского государственного университета. Серия «Естественные и физико-математические науки». 2015. № 7. С. 21–32.

54. Книжников Ю.Ф. Аэрокосмические методы географических исследований. М.: Изд-во «Академия». 2004. 336 с.

55. Терехин Э. А. Эмпирическая оценка и картографирование таксационно-биометрических характеристик лесных насаждений по материалам космической съёмки Landsat TM // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2012. Т. 9. № 1. С. 122–130.

56. Сочилова Е.Н., Ершов Д.В. Анализ возможности определения запасов древесных пород по данным Landsat ETM // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2012. Т. 9. № 3. С. 277–282.

57. Смышляков С.Г. Особенности дешифрирования ландшафтов по мультиспектральным космическим снимкам для создания карты элементов среды обитания охотничьих ресурсов // Геоматика. Москва: Совзонд. 2013. № 1. С. 53–62.

58. Quinn W.J. Band combination [Электронный ресурс]: URL: <http://web.pdx.edu/~emch/ip1/bandcombinations.html> (Дата обращения 08.06.2017).

References

1. Kashkin V.B., Sukhinin A.I. Remote sensing of the Earth from space. Digital Image Processing. М.: Logos, 2001. 264 p. (in Russian).

2. Chandra A.M., Gosh S.K. Remote sensing and geographic information systems. М.: Tekhnosfera, 2008. 312 p. (in Russian).

3. Miklashevich T.S., Bartalev S.A. Method for determination of phenological characteristics of vegetation cover on the basis of time series of satellite data // Sovremennyye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa. 2016. V. 13. № 1. P. 9–24 (in Russian).

4. Olsson H. A method for using Landsat time series for monitoring young plantations in boreal forests // International Journal of Remote Sensing. 2009. № 30 (19). P. 5117–5131.

5. Sidko A.F., Shevyrnogov A.P. Spectral brightness of plants, as a basis for remote diagnosis of agricultural crops // DAN. 1997. Т. 354. № 1. P. 120–122 (in Russian).

6. Zhuravel Yu.N., Fedoseyev A.A. Efficiency of using multispectral and hyperspectral remote sensing data in environmental monitoring tasks // Vestnik Samarskogo gosudarstvennogo aerokosmicheskogo universiteta. 2013. № 4 (42). P. 38–48 (in Russian).

7. Garbuk S.V., Gershenson V.E. Satellite remote sensing systems of the Earth. М.: Izdatelstvo A i B, 1997. 296 p. (in Russian).

8. Vorobyev O.N., Kurbanov E.A., Polevshchikova Yu.A., Lezhnin S.A. Assessment of the dynamics of disturbance of forest cover in the middle of the Volga region from Landsat images // Sovremennyye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa. 2016. V. 13. № 4. P. 124–134 (in Russian).

9. Smith J.A., Tzeu L.L., Ranson K.J. The lambertian assumption and Landsat data // Photogrammetric Engineering and Remote Sensing. 1980. V. 46. P. 1183–1189.

10. Meyer P., Itten K.I., Kellenberger T., Sandmeier S., Sandmeier R. Radiometric corrections of topographically induced effects on Landsat TM data in an alpine environment // ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing 1993. 48. P. 17–28.

11. Savorskiy V.P., Smirnov M.T., Tishchenko Yu.G. Reference information system on satellite monitoring of the Earth // Sovremennyye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa. 2006. V. 3. № 1. P. 198–205 (in Russian).

12. Koshko A.A. Earth remote sensing satellite Landsat 8 // Real estate cadastre and monitoring of natural resources. Materials of the international scientific and technical Internet conference (in Russian).

13. Sharing Earth Observation Resources [Internet resource]: <https://directory.eoportal.org/web/eoportal/satellite-missions/l/landsat-8-ldcm>. (Date of the application 08.06.2017).

14. Roy D.P., Wulder M.A., Loveland T.R. Landsat-8: Science and product vision for terrestrial global change research // Remote Sensing of Environment. 2014. № 145. P. 154–172.

15. Proshin A.A., Lupyan E.A., Balashov I.V., Kashnitskiy A.V., Burtsev M.A. Creation of a unified system for maintaining satellite data archives intended for building modern remote monitoring systems // Sovremennyye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa. 2016. V. 13. № 3. P. 9–27 (in Russian).

16. Lupyan E.A., Balashev I.V., Burtsev M.A., Efremov V.Yu., Mazurov A.A., Maltsev D.V., Matveyev A.A., Proshin A.A., Toplin V.A., Khalikova O.A., Krashennikova Yu.S. Possibilities of working with a long-term archive of Landsat satellite data across Russia and border countries // Sovremennyye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa. 2012. V. 9. № 3. P. 307–315 (in Russian).

17. Neil flood continuity of reflectance data between Landsat-ETM+ and Landsat-8 OLI, for both top-of-atmosphere and surface reflectance: A study in the Australian landscape // Remote Sens. 2014. № 6. P. 7952–7970.

18. Golitsyn G.S., Rutkevich B.P., Rutkevich P.B. Lower cloud limit // Sovremennyye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa. 2006. V. 3. № 1. P. 263–269 (in Russian).

19. Landsat 8 (L8) Data Users Handbook, LSDS-1574, version 1.0. Sioux Falls, USA: USGS EROS, 2015. 98 p.

20. James S., Choate M., Moe D. Landsat 8 thermal infrared sensor geometric characterization and calibration // Remote Sensing 6. 2014. № 11. P. 11153–11181.

21. Belova E.I., Ershov D.V. Method for creating cloudless composite images using satellite data LANDSAT // The 8-th open All-Russian conference "Modern problems of Earth remote sensing from space: Physical basics, methods and technologies for monitoring the environment, potentially Hazardous Phenomena and Objects". 2010. P. 33–34 (in Russian).
22. Cherepanov A.S. Vegetation indices: reference materials // Geomatika. 2011. № 2. P. 98–102 (in Russian).
23. Lidzhiyeva N.Ts., Ulanova S.S., Fedorova N.L. The experience of using the vegetation index (NDVI) to determine the biological productivity of phytocenoses of the arid zone in the example of the region Chernyye Zemli (Black Lands) // Izvestiya Saratovskogo universiteta. Ser. Khimiya. Biologiya. Ekologiya. 2012. V. 2. № 12. P. 94–96 (in Russian).
24. Kravtsova V.I. Space methods of soil investigation. M.: Aspekt Press, 2005. 190 p. (in Russian).
25. Kondratenkov G.S., Frolov A.Yu. Radiovision. Radar systems for remote sensing of the Earth. Textbook for high schools. M.: Radiotekhnika, 2005. 368 p. (in Russian).
26. Shovengerdt R.A. Remote sensing. Models and methods of image processing. M.: Tekhnosfera, 2010. 560 p. (in Russian).
27. Garkusha I.N. Automation of processes of satellite images in problems of thermal mapping of cities // Zb. nauk prats NGU. D.: Natsionalnyy gornyy universitet. 2013. № 40. P. 114–120 (in Russian).
28. Adamovich T.A., Ashikhmina T.Ya., Kantor G.Ya., Savinykh V.P. Application of Landsat 8 data in the study of natural complexes // Ecology of the native land: problems and ways of their solution: Materials of 12-th All-Russia scientific and practical conference with international participation. Book 1. Kirov: VyatGU, 2017. P. 19–22 (in Russian).
29. Combining multichannel data into a single file in ENVI (Obyedineniye mnogokanalnykh dannykh v edinyy fayl v ENVI) // GIS-Lab: Geographic information systems and remote sensing [Internet resource]: <http://gis-lab.info> (Date of the application 08.06.2017) (in Russian).
30. Isayev A.S. Use of satellite data for monitoring of forest biodiversity // Issledovaniye zemli iz kosmosa. 2009. № 2. P. 1–12 (in Russian).
31. Savin I.Yu., Simakova M.S. Satellite technologies for soil inventory and monitoring in Russia // Sovremennyye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa. 2012. V. 9. № 5. P. 104–115 (in Russian).
32. Belyayev B., Kizyak E., Khrushcheva E. Research of seasonal dynamics of spectral-reflective properties of agricultural crops in Belarus based on field spectrometry and remote sensing materials of the Earth // Zemlya Belarusi. 2016. № 2. P. 42–46 (in Russian).
33. Kurganovich K.A., Noskova E.V. The use of water indices to assess the change in the area of the water mirror of the soda lakes of the Southeast of the Transbaikal according to remote sensing data // Vestnik ZabGU. 2015. № 6 (121). P. 16–24 (in Russian).
34. Feyisa G.L., Meilby H., Fensholt R., Proud S.R. Automated water extraction index: A new technique for surface water mapping using Landsat imagery // Remote Sensing of Environment. 2014. № 140. P. 23–35.
35. Klimanova O.A., Ospanov A.E. Experience of using maps of regional atlases and images from Landsat-5, 7, 8 for analysis of land use transformation in Northern Kazakhstan in 1953-2015 // Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Geodeziya i aerofotosyemka. 2016. V. 60. № 5. P. 13–19 (in Russian).
36. Korniyenko S.G. Assessment of the impact of the development of the Urengoy oil and gas condensate field on the state of the forest-tundra territory according to Landsat satellites // Issledovaniye Zemli iz kosmosa. 2009. № 4. P. 78–87 (in Russian).
37. Tsydypov B.Z., Mironov I.A., Kulikov A.I. Identification of desert areas based on a comprehensive analysis of multispectral (Landsat) and radar (SRTM) satellite data // Vestnik IrGTU. 2012. № 4. P. 67–73 (in Russian).
38. Povkh V. I., Garbuzov G.P., Shlyakhova L.A. Space monitoring of agricultural lands of the Rostov region // Issledovaniye Zemli iz kosmosa. 2006. № 3. P. 89–96 (in Russian).
39. Martynyuk V.A. Monitoring of lake-marsh systems areas of the region based on remote sensing data of the Earth // Environmental monitoring: sb. materialov II mezhdunarodnoy nauch.-prakt. konf. Brest: BrGU, 2013. P. 118–121 (in Russian).
40. Bartalev S.A., Belyayev A.I., Egorov V.A., Ershov D.V., Korovin G.N., Korshunov N.A., Kotelnikov R.V., Lupyan E.A. Validation of the results of detection and assessment of areas damaged by forest fires from satellite monitoring data // Modern problems of remote sensing of the Earth from space: Physical fundamentals, methods and technologies of monitoring the environment, potentially dangerous objects and phenomena. Collection of scientific articles. M.: GRANP polygraph, 2005. V. 2. P. 343–353 (in Russian).
41. Bartalev S.A., Lupyan E.A., Stytsenko F.V., Panova O.Yu., Efremov V.Yu. Express mapping of damages of Russian forests by fires on Landsat satellite data // Sovremennyye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa. 2014. V. 11. № 1. P. 9–20 (in Russian).
42. Loupian E.A., Mazurov A.A., Flitman E.V., Ershov D.V., Korovin G.N., Novik V.P., Abushenko N.A., Altyntsev D.A., Koshelev V.V., Tashchilin S.A., Tatarnikov A.V., Csiszar I., Sukhinin A.I., Ponomarev E.I., Afonin S.V., Belov V.V., Matvienko G.G., Loboda T.V. Satellite monitoring of forest fires in Russia at federal and regional levels // Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change. 2006. № 11. P. 113–145.
43. Sidorenkov V.M., Doroshchenkova E.V., Zhafyarov A.V., Ilin F.S. Assessment of the potential of different types of felling based on the analysis of Landsat 8 satellite data // Lesotekhnicheskyy zhurnal. 2015. V. 5. № 1 (17). P. 97–109 (in Russian).

44. Tikhomirov O.A., Bocharov A.V., Komissarov A.B., Khizhnyak S.D., Pakhomov P.M. Use of Landsat 8 OLI sensor data to estimate turbidity, chromaticity and chlorophyll content in the water of the Ivankovskoye reservoir // Vestnik Tverskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Khimiya. 2016. № 2. P. 230–244 (in Russian).
45. Sborishuk Yu.N. Remote methods of inventory and monitoring of soil cover. M.: Izd-vo MGU, 1992. Part 1. 86 p. (in Russian).
46. Terekhov A.G., Pak I.T., Dolgikh S.A. Data of Landsat-5, 7, 8 and WVH in the task of monitoring the hydrological regime of the Kapshagay reservoir on the Tekes river (the Chinese part of the Ile river basin) // Sovremennyye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa. 2015. V. 12. № 6. P. 174–182 (in Russian).
47. Silkin K.Yu. Method for assessing the ecological state of the Voronezh reservoir based on materials of multi-zone remote sensing // Vestnik VGU. Seriya: Geologiya. 2012. № 1. P. 220–223 (in Russian).
48. Laverov N.P., Popovich V.V., Vedeshin L.A., Galyano F.R. Methods for analyzing remote sensing data // Sovremennyye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa. 2015. V. 12. № 6. P. 145–153 (in Russian).
49. Li S., Chen X. A new bare-soil index for rapid mapping developing areas using Landsat 8 data // The international archives of the photogrammetry, remote sensing and spatial information sciences: ISPRS technical commission IV symposium. V. XL-4. Suzhou, China. 2014. P. 139–144.
50. Gornyy V.I. Satellite measuring methods of infrared thermal range in monitoring potentially dangerous phenomena and objects // Sovremennyye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa. 2004. V. 2. № 1. P. 10–16 (in Russian).
51. Kuular Kh.B. Evaluation of the Uyuck mountain ridge on the basis of Landsat data // Sovremennyye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa. 2013. V. 10. № 4. P. 239–244 (in Russian).
52. Zhilenev M.Yu. Overview of the application of multispectral remote sensing data and their combinations in digital processing // Geomatika. 2009. № 3. P. 56–64 (in Russian).
53. Evdokimov S.I., Mikhlap S.G. Determining the physical meaning of the Landsat image channels combination for monitoring the state of terrestrial and aquatic ecosystems // Vestnik Pskovskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya “Estestvennyye i fiziko-matematicheskiye nauki”. 2015. № 7. P. 21–32 (in Russian).
54. Knizhnikov Yu.F. Aerospace methods of geographical research. M.: Izd-vo “Akademiya”. 2004. 336 p. (in Russian).
55. Terekhin E.A. Empirical assessment and mapping of the biometric characteristics of forest plantations based on the Landsat TM satellite imagery // Sovremennyye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa. 2012. V. 9. № 1. P. 122–130 (in Russian).
56. Sochilova E.N., Ershov D.V. Analysis of the possibility of determining the stocks of tree species according to Landsat ETM data // Sovremennyye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa. 2012. V. 9. № 3. P. 277–282 (in Russian).
57. Smyshlyakov S.G. Features of interpretation of landscapes on multispectral space images for creating a map of the elements of habitat of hunting resources // Geomatika. Moskva: Sovzond. 2013. № 1. P. 53–62 (in Russian).
58. Quinn W.J. Band combination [Internet resource]: <http://web.pdx.edu/~emch/ip1/bandcombinations.html> (Date of the application 08.06.2017).

Оценка скорости континентального осадконакопления при формировании белгородской почвенно-осадочной последовательности

© 2017. А. С. Керженцев¹, д. б. н., профессор, гл. н. с.,
В. Е. Остроумов², с. н. с.,

¹Институт фундаментальных проблем биологии РАН,
142290, Московская область, г. Пущино, ул. Институтская, 2,

²Институт физико-химических и биологических проблем почвоведения РАН, 142290,
Московская область, г. Пущино, ул. Институтская, 2,
e-mail: kerzhent@rambler.ru, v.ostroumov@rambler.ru

Приводится интерпретация данных о строении почвенно-осадочных толщ Среднерусской возвышенности, вскрытых разрезами участка Ямская степь (заповедник Белогорье) и Александровский. По морфологическим признакам установлены эволюционные изменения ландшафтных условий во время формирования толщ в позднем плейстоцене – голоцене. На основании радиоуглеродных датировок определены скорости осадконакопления, характерное значение которых соответствует порядку 0,1 мм/год. Показано, что основным источником осадочного материала и нарастания толщи осадков являются отходы метаболизма экосистем, формируемые в процессе почвообразовательной трансформации опада, подстилки и гумуса с образованием отходов в форме глинистых кутан, железо-марганцевых и карбонатных конкреций, вторичных и первичных минералов, которые превращаются в седименты осадочных пород. За истекший период голоцена (10 тыс. лет) накопилось 420 см осадков, слои которых менялись в соответствии со сменой природных зон по мере снижения влияния отступающего ледника: тундра, тайга, хвойно-широколиственные леса, лесостепи, степи. Стабильные условия климатического оптимума с настоящими степями и типичными черноземами установились на данной территории 5500 лет назад. За это время накопилась толща лессовидных суглинков 220 см. Полученные оценки скорости накопления осадка подтверждают целесообразность учета континентального осадконакопления при описании механизмов формирования почвенно-осадочных последовательностей.

Ключевые слова: почвенно-осадочная последовательность, почвообразование, осадконакопление, чернозём, почвенный криогенез, возраст почв, остаточные продукты почвообразования, поздний плейстоцен, голоцен.

Estimation of the continental sedimentation rate in the Belgorod soil-sediment sequence

A. S. Kerzhentsev¹, V. E. Ostroumov²,

¹ Institute of Fundamental Problems of Biology, Russian Academy of Sciences,
2 Institutskaya St., Pushchino, Moscow region, Russia, 142290,

² Institute of Physicochemical and Biological Problems of Soil Science,
Russian Academy of Sciences,

2 Institutskaya St., Pushchino, Moscow region, Russia, 142290,
e-mail: kerzhent@rambler.ru, v.ostroumov@rambler.ru

Authors interpret the data on the soil and sedimentary strata of the Central Russian Up-land (key sites Alexandrovsky and Yamskaya steppe, Belogorie reserve). We used the soil morphology data to reconstruct the evolutionary changes of the environment during the late Pleistocene and Holocene. The sedimentation rate was calculated using a linear approximation of the radiocarbon data. Typical values of the sedimentation rate are of the order of 0.1 mm/year. It was shown that the main source of sediment and sediment layer growth are residual products of soil formation formed in the process of tree waste, forest litter, and humus transforming into clay cutans, ferromanganese nodules and calcareous murrans, original and secondary minerals which turn into sedimentary rocks. During Holocene (10000 years) 420 sm sediment accumulated, their layers changed with the change of natural zones in course of decreasing impact of retreating glacier: tundra, taiga, coniferous broadleaved forest, forest steppe, steppe. Stable climatic optimum with real steppes and typical chernozem established on the territory 5500 years ago. Within this period of time 220 sm layer of loess loam

got accumulated there. The residuals appear inside the soil profile during transformation of litter, soil-forming rocks, and mineral eolian sediment. The estimated sedimentation rate can be used to describe the mechanisms of formation of soil-sedimentary sequences.

Keywords: soil-sedimentary sequence, soil formation, sedimentation rate, chernozem, soil cryogenesis, soil age, soil residuals, late Pleistocene, Holocene.

Для участников полевой экскурсии VII съезда Общества почвоведов им. В. В. Докучаева и Всероссийской с зарубежным участием научной конференции «Почвоведение – продовольственной и экологической безопасности страны» (Белгород, 15–22 августа 2016 г.) в заповеднике Белогорье в урочище Ямская степь организаторы подготовили уникальный разрез сложноорганизованной почвенно-осадочной последовательности. Разрез находится на водоразделе между сухими (без постоянных водотоков) ложбинами на водосборной площади притоков р. Оскол. Его детальное описание, проиллюстрированное фотографиями, представлено в [1]. Почвенно-осадочная толща, вскрытая разрезом до глубины в 6,5 м, сформирована в течение последнего климатического макроцикла (~150 тыс. лет назад), то есть в позднем плейстоцене и голоцене. Разрез обеспечивает прекрасный обзор всех деталей обнажения, а приведённые описания, результаты анализов и радиоуглеродные датировки позволяют оценить скорость поступления осадочного вещества на поверхность и рассмотреть её изменения на протяжении позднего плейстоцена – голоцена. В настоящее время белгородская почвенно-осадочная последовательность развивается как открытая динамическая система в природно-техногенном комплексе [2], и описание её динамики требует учёта темпов осадконакопления и гипергенетической трансформации осадочного вещества.

По данным радиоуглеродного датирования гумус верхнего горизонта чернозёма (0–20 см) имеет калиброванный возраст 800 ± 80 лет. Наиболее древний датированный образец с глубины 230 см в этой почвенно-осадочной толще имеет радиоуглеродный возраст 28781 ± 379 лет [1]. Эти данные позволяют по простой линейной зависимости оценить среднюю скорость поступления осадочного вещества в $0,079$ мм/год. Такая оценка не учитывает возможных изменения скорости осадконакопления, его перерывов и эрозионных этапов развития толщи, однако даёт возможность представить себе темпы преобразования поверхности в условиях платформенного развития.

Самый нижний слой вскрытой толщи (600–650 см) представлен песчаными отложениями олигоцена [1]. На них залегают палеопочва микулинского межледниковья мощностью 180 см (420–600 см) с явными признаками криогенеза. Светлые тона окраски материала вышележащего слоя позволяют предположить, что это элювиальный горизонт, сформированный в эпоху вытаявания повторных ледов. Положение в стратиграфической последовательности и форма границ показывают, что время формирования слоя совпадает с отступанием последнего поздневалдайского (осташковского) оледенения.

Слой 600–420 см также формировался в условиях активного криогенеза. Об этом говорят округлённые очертания полигональных блоков и заполненные органическим веществом полигональные трещины. Обилие погребённого органического вещества может быть результатом накопления торфа торфяно-болотными почвами. По данным [3], накопление торфа происходит со скоростью $0,15–0,30$ мм/год. В метаболизме болотных экосистем торф превращается в сапрпель, а сапрпель в глей – остаточную минеральную массу глинистого мехсостава. Если принять минимальную скорость прироста торфа $0,15$ мм/год, а скорость его превращения в сапрпель и глей $0,1$ мм/год, то просто вычислить, что слой толщиной 180 см (600–420 см) мог накопиться в течение 18000 лет. Его накопление началось 28500 лет назад. Возможно, что углерод именно этого времени, пройдя несколько циклов метаболизма разных типов экосистем, оказался в составе гумуса в слоях с радиоуглеродными датировками 25–28 тыс. лет. Совпадение дат позволяет оценить скорость образования остаточных продуктов в системе торф – сапрпель – глей в $0,1$ мм/год.

Ранневалдайские педиседименты участка Ямская степь, очевидно, синхронны с селиховодворским лёссом и с фрагментами стрелецкой палеопочвы разреза Александровский. Александровский разрез – опорный для позднего плейстоцена перигляциальной области Среднерусской возвышенности [4, 5]. Его расположение в соседстве с участком

Ямская степь (в 120 км к СЗ), принадлежность обоих участков к общему тектоническому линеamentу, а также геоморфологическое сходство дают возможность сопоставить почвенно-осадочные образования участков и историю их формирования. Наиболее ранняя радиоуглеродная дата в разрезе александровской толщи (49500 ± 520 лет назад) относится к средневалдайской интерстадиальной почве, залегающей на глубине 380–420 см [5]. В почвенно-осадочной последовательности Ямской степи этому времени соответствует один из педиседиментов в диапазоне глубин 220–260 см. Выше по разрезу александровской толщи следуют тускарский оглеённый лёсс и почва брянского межстадиального времени. Ранний и поздний ритмы брянской почвы в разрезе Ямской степи (28781 ± 379 и 25113 ± 355 лет назад) близки ко времени брянского межстадиала Александровского разреза (33140 ± 230 лет назад). Александровский лёсс поздневалдайского времени, содержащий делли, имеет датировки 11140 ± 190 и 12200 ± 180 лет назад [5]. В толще Ямской степи александровскому поздневалдайскому лёссу соответствуют нижние горизонты профиля чернозёма.

Радиоуглеродные даты в Александровском разрезе (рис. 1) позволяют оценить скорость поступления осадочного материала на поверхность в средне-верхневалдайское время. Зависимость возраста осадка от времени здесь не содержит признаков инверсии, перерывов в осадконакоплении и других проявлений

неравномерности поступления осадочного вещества на поверхность. Форма зависимости близка к линейной. Это позволяет линейной аппроксимацией найти скорость осадконакопления, которая оставляет $0,112$ мм/год.

Белгородскую почвенно-осадочную последовательность на участке Ямская степь венчает профиль чернозёма. Многочисленные материалы, обобщённые в труде [6], «однозначно указывают на «нормальное» развитие чернозёмов – рост гумусового профиля вглубь почвообразующей породы – как на наиболее приемлемый, не противоречащий наблюдаемым фактам вариант генезиса этих почв. Гипотеза палеогидроморфизма и эолового роста профиля вверх не находят (так в тексте оригинала) подтверждения в ряде свойств и их изменений во времени» (с. 131). Гипотезе «нормального» развития чернозёма вполне соответствуют представления о миграционно-мицеллярном происхождении карбонатного профиля чернозёмов Ямской степи [1].

По гипотезе [7], многие дневные почвы возникали в ходе континентального осадочного процесса при синхронной трансформации осадочного вещества под влиянием факторов почвообразования (гипотеза нарастания профиля вверх). Подтверждены высказанные ранее суждения [8–10] о почвенном происхождении лёссов. Гипотеза Неуструева – Личкова – Берга о происхождении почвенно-осадочных толщ наиболее полно объясняет формирование белгородской последовательности в целом и входящих в нее почвенных профилей.

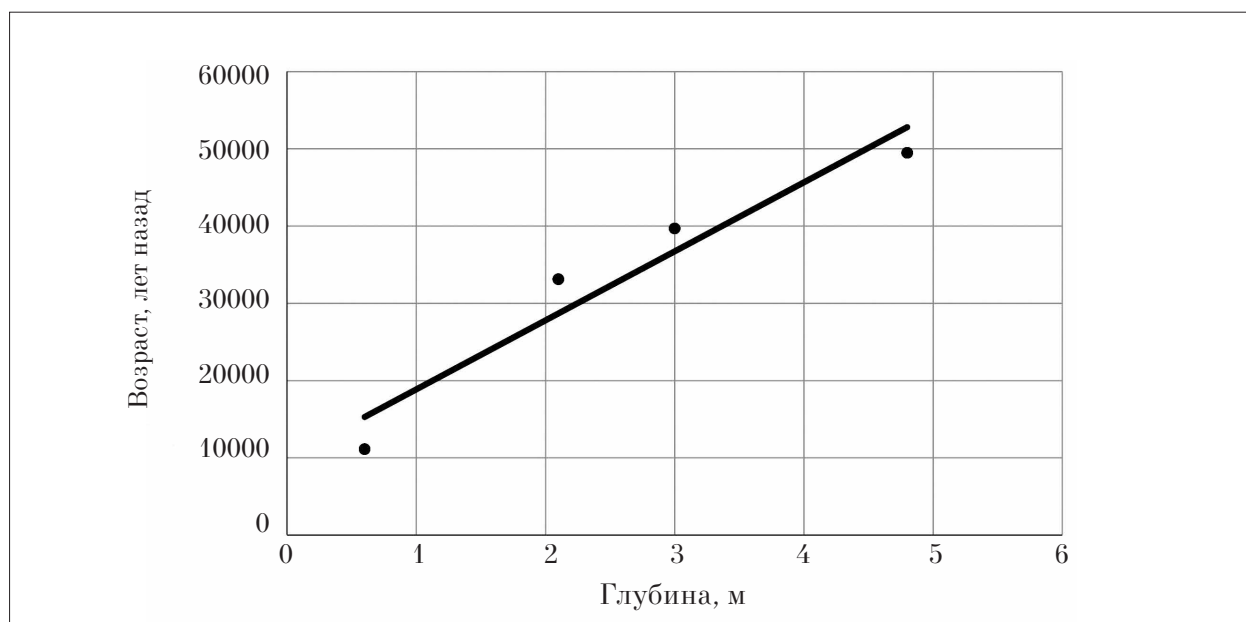


Рис. 1. Возраст осадков опорного разреза Александровский по радиоуглероду в околоредельной области по [5]. Средняя скорость осадконакопления $0,112$ мм/год

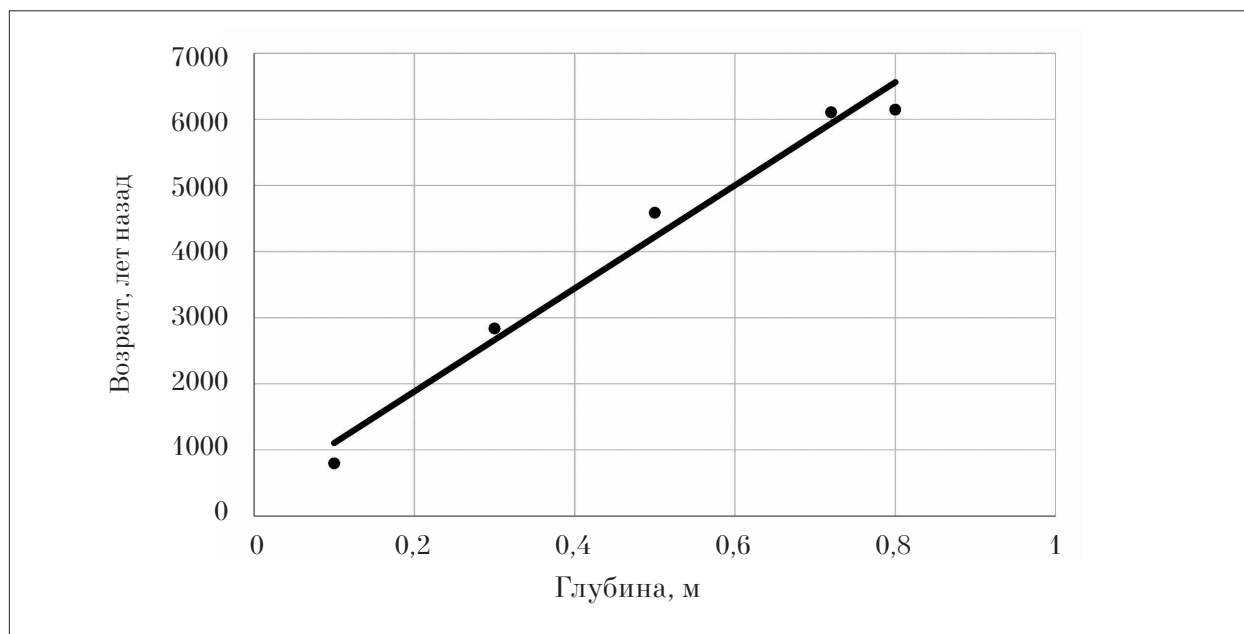


Рис. 2. Возраст гумуса в профиле чернозёма на участке Ямская степь по данным [4]. Средняя скорость осадконакопления, вычисленная по линейному уравнению, составляет 0,128 мм/год

По гипотезе «нормального» развития подвижные органические вещества постепенно пропитывают профиль чернозёма, так что наиболее подвижные легкие фракции гумуса проникают на большие глубины. Если подвижность гумуса не зависит от его возраста, то постоянное пропитывание почвообразующей толщи должно привести к образованию профиля гумуса с одинаковым по глубине возрастом. Это предположение проверяется по данным радиоуглеродного возраста чернозёма белгородской почвенно-осадочной последовательности. На рисунке 2 показаны датировки гумуса в профиле этой почвы. Наблюдается увеличение возраста гумуса с глубиной. На графике зависимости возраста гумуса от глубины это увеличение имеет постепенный характер. Как и в случае более древних образований Александровского разреза (рис. 1), признаки инверсии или перерывов в осадконакоплении здесь (рис. 2) отсутствуют. Форма зависимости возраста гумуса чернозёма от глубины близка к линейной. Скорость осадконакопления, вычисленная по данным рисунка 2 (0,128 мм/год), не отвергает справедливости гипотезы образования чернозёма за счёт нарастания вниз. Однако при такой скорости 40 тысяч лет достаточно для накопления слоя осадка мощностью в 5,1 м. Это подтверждает целесообразность учёта роли осадконакопления в формировании почвенного профиля.

Получены следующие оценки скорости накопления осадочного материала при фор-

мировании белгородской почвенно-осадочной последовательности:

- 0,079 мм/год в среднем для датированного фрагмента толщи на участке Ямская степь;
- 0,1 мм/год для системы торф – сапропель – глей в слое, подстилающем дневную чернозёмную почву в том же разрезе;
- 0,112 мм/год в осадках средне- и поздневалдайского возраста в разрезе Александровский;
- 0,128 мм/год в профиле чернозёма в почвенно-осадочной последовательности участка Ямская степь.

Близость полученных значений позволяет считать величины порядка 0,1 мм/год характерными для скорости осадконакопления Среднерусской возвышенности в позднем плейстоцене – голоцене. В рамках гипотезы [6, 8] о происхождении почвенно-осадочных толщ полученные оценки скорости осадконакопления позволяют учитывать вклад осадочного процесса в формирование профилей погребённых и дневных почв возвышенности. Очевидный источник осадочного вещества – минеральная эоловая пыль. Вместе с общей массой опада и материалом почвообразующей породы пыль трансформируется в зоне действия факторов почвообразования. Накопление остаточных продуктов, образующихся при почвообразовании, способно обеспечивать увеличение мощности почвенных профилей с найденными скоростями.

Литература

1. Путеводитель научных полевых экскурсий VII съезда Общества почвоведов им. В. В. Докучаева и Всероссийской с зарубежным участием научной конференции «Почвоведение – продовольственной и экологической безопасности страны» // Под ред. Ю.Г. Чендева. М.-Белгород. БелГУ, 2016. 122 с.
2. Садов А.В. Теоретические подходы к изучению и оценке состояния окружающей среды // Теоретическая и прикладная экология. 2008. № 1. С. 11–19.
3. Елина Г.А., Кузнецов О.А., Максимов А.И. Структурно-функциональная организация и динамика болотных экосистем Карелии. Л.: Наука, 1984. 128 с.
4. Шик С.М., Борисов Б.А., Заррина Е.П. Проект региональной стратиграфической схемы неоплейстоцена Европейской России // Бюл. Комис. по изучению четвертичного периода. 2004. № 65. С. 102–114.
5. Сычёва С.А. Палеомерзлотные события в периглациальной области Среднерусской возвышенности в конце среднего и позднем плейстоцене // Криосфера Земли. 2012. Т. XVI. № 4. С. 45–56.
6. Марголина Н.Я., Александровский А.Л., Ильичёв Б.А., Черкский А. Е., Чичагова О.А. Возраст и эволюция чернозёмов / Под ред. В.О. Таргульяна. М.: Наука, 1988. 144 с.
7. Личков Б.Л. Современный литогенезис на материковых равнинах // Изв. АН СССР. Сер. Географич. и геофизич. 1945. Т. IX. № 5–6. С. 547–564.
8. Богословский Н.А. О некоторых явлениях выветривания в области Русской равнины // Изв. Геол. ком-та. 1899. Т. 18. № 5. С. 235–273.
9. Берг Л.С. О происхождении лёсса // Изв. Русского географического общества. 1916. Т. 52. Вып. 8. С. 579–646.
10. Неуструев С.С. Почвенная теория лёссовобразования // Природа. 1925. № 1–3. С. 47–56.

References

1. Guide scientific field excursions of the VII Congress of the Society of soil scientists named after V. V. Dokuchaev and the All-Russia scientific conference with international participation “Soil science – food and environmental security of the country” // Ed. Yu.G. Chendev. M.-Belgorod. BelGU, 2016. 122 p. (in Russian).
2. Sadov A.V. Theoretical approach to investigation and evaluation of environmental state // Theoretical and Applied Ecology. 2008. № 1. P. 11–19 (in Russian).
3. Elina G.A., Kuznetsov O.A., Maksimov A.I. Structural-functional organization and dynamics of mire ecosystems in Karelia. Leningrad: Nauka, 1984. 128 p. (in Russian).
4. Shik S.M., Borisov B.A., Zarrina E.P. Project regional stratigraphic scheme of the Neopleistocene of European Russia // Byul. komis. po izucheniyu chetvertichnogo perioda. 2004. № 65. P. 102–114 (in Russian).
5. Sycheva S.A. Palmerstone events in periglacial region of the Central Russian upland in the late middle and late Pleistocene // Kriosfera Zemli. 2012. T. XVI. № 4. P. 45–56 (in Russian).
6. Margolina N.Ya., Aleksandrovskiy A.L., Ilichev B.A., Cherkaskiy A.E., Chichagova O.A. Age and evolution of chernozems / Ed. V.O. Targulyan. M.: Nauka, 1988. 144 p. (in Russian).
7. Lichkov B.L. Modern lithogenesis on the mainland plains // Izv. AN SSSR. Ser. Geografich. i geofizich. 1945. T. IX. № 5–6. P. 547–564 (in Russian).
8. Bogoslovskiy N.A. Some phenomena of weathering in the area of the Russian plain // Izv. geol. kom-ta. 1899. T. 18. № 5. P. 235–273. (in Russian).
9. Berg L.S. On the origin of loess // Izv. Russkogo geograficheskogo obshchestva. 1916. T. 52. V. 8. P. 579–646 (in Russian).
10. Neustruyev S.S. Soil theory lisoobrobna // Priroda. 1925. № 1–3. P. 47–56 (in Russian).

Загрязнение и очищение водотоков и водосборных территорий вследствие эрозии

© 2017. Н. В. Коломийцев, к. г.-м. н., доцент, ученый секретарь,
Б. И. Корженевский, к. г.-м. н., с. н. с.,
Всероссийский научно-исследовательский институт гидротехники
и мелиорации им. А. Н. Костякова,
127550, Россия, г. Москва, ул. Большая Академическая, 44,
e-mail: kolomiytsev@vniigim.ru, 542609@list.ru

При оценке негативного воздействия эрозии почв главное внимание уделяется потерям плодородия почв и, как следствие, потери урожая. При этом игнорируются другие последствия эрозии почв: заиление и загрязнение водоёмов, нарушение структуры и снижение устойчивости ландшафта к негативным воздействиям и др. Современное освоение склонов, их техногенно обусловленное состояние определяет эродированность, загрязнённость, транзит и аккумуляцию загрязнителей. В работе рассмотрена взаимозависимость современной морфологии склонов и их эродированности и её влияние на загрязнённость водных объектов. В зависимости от эродированного участка или территории процесс может оказывать двоякое влияние на загрязнение водного объекта. Механизм переноса загрязнителей и самоочищения определяется морфометрическими и гидрологическими характеристиками и гидрохимическим режимом водоёма, видами техногенного воздействия. Особая роль в процессах самоочищения рек принадлежит пойменным территориям. Влияние пойменных земель на состояние водных объектов двояко. С одной стороны, широкие поймы являются улучшающим фактором, осаждая в половодья загрязнители. С другой, интенсивное сельскохозяйственное использование пойменных земель нередко приводит к ухудшению экологической ситуации нижележащих водных экосистем. При смыве загрязнителей с городских и промышленных зон отмечается загрязнение донных отложений, что является наиболее типичной ситуацией. Обратная ситуация – достаточно редка. В случаях эрозионного стока с «условно чистых» территорий происходит разбавление загрязнённых донных отложений водных объектов. Представлены балльные оценки морфометрических показателей рельефа, интенсивность эрозионного процесса в зависимости от уклона, освещены принципы комплексной агроэкологической оценки и группировки земель для их рационального использования. Рассмотрена иерархия воздействия, как отдельных факторов, так и их совокупности в пределах экосистем. В четырёхгранной схеме его целесообразно градуировать в виде ряда: «слабое – умеренное – сильное – опасное». Отмечены события с возможным восстановлением системы при слабых воздействиях. Показано, что при сильных воздействиях возможна её трансформация в другую систему с новыми свойствами. Техногенные объекты являются источниками как повышения, так и сокращения эрозионной активности. В бассейнах с минимальным техногенным воздействием морфология склонов определяет транзит загрязнителей в пределах постоянных и временных водотоков, а в некоторых обстоятельствах и их аккумуляцию. В бассейнах, в которых ведётся интенсивная хозяйственная деятельность, искусственно созданная морфология склонов урбанизированных территорий может определять как загрязнение в зонах аккумуляции, так и очищение в зонах смыва загрязнителей и их транзита.

Ключевые слова: эрозия, загрязнённость, водные и техногенные объекты, малые реки, почвы, мониторинг земель, экосистемы.

Contamination and purifying of water streams and landscapes due to erosion

N. V. Kolomiytsev, B. I. Korzhenevskiy,
Kostyakov All-Russian Research Institute of Hydraulic Engineering and Irrigation,
44, Bolshaya Akademicheskaya St., Moscow, Russia, 127550,
e-mail: kolomiytsev@vniigim.ru, 542609@list.ru

Evaluating the negative impact of soil erosion they pay attention to loss of soil fertility and, thus, to loss of crop. At the same time other consequences of soil erosion are being often ignored, such as sedimentation and pollution of water bodies, structure violation and decrease of resistance to negative impacts of the landscape, etc. Erodibility, pollution, as well as transit and accumulation of pollutants depend on the present development of slopes. This paper considers the interrelation of the present morphology of slopes and their erodibility, as well as its influence on the pollution of water objects. Depending on the eroded site or territory the process can have a two-sided effect on pollution of the water body. The ways of transmitting pollutants and self-purification is determined by the morphometric and hydrological properties, and by the hydrochemical regime of the water body, as well as by the types of technogenic impact on it. Floodplains have a special influence on self-

purification processes. On the one hand, broad floodplains improve the situation, stimulating sedimentation of pollutants during floods, on the other hand, intensive agricultural utilization of floodplains causes degradation of the ecological situation in the lower water ecosystems. Washing away the pollutants from the city and the industrial areas leads to pollution of sediment, which is the most typical fact. It seldom happens otherwise. In case of erosion flood from “relatively clean” territories due to the influx of water the concentration of pollutants in bottom sediment gets a bit decreased. Morphometric relief indexes, as well as erosion intensity according to the degree of slope are given, the principles of complex agricultural-ecological assessment and lands classification are suggested for the sake of their rational use. The hierarchy of influence both of separate factors and their complexes within ecosystems is considered. According to a four-grade system it is to be ranged into “weak – moderate – strong – dangerous”. The cases with a possible restoration of the system at weak impacts are shown. It is shown that in case of a strong impact it is transformed into another system with other new properties. Technogenic objects are sources of increase of decrease of erosion activity. In pools with minimal technogenic impact slopes morphology determines pollutants transmission within permanent and temporary water flows, as well as their accumulation in some of them. In pools with intensive anthropogenic activity an artificial slope morphology of urban territories can determine both pollution in accumulation zones and purification in pollutants’ wash-off and transition.

Keywords: erosion, contamination, water bodies, small rivers, soil, land monitoring, ecosystem.

В условиях современного освоения склонов, их техногенно обусловленное состояние определяет эродируемость, загрязнённость, а также транзит и аккумуляцию загрязнителей. Одной из важнейших задач эрозионных исследований является оценка эрозионной опасности земель. Эрозионно опасными считаются такие земли, на которых сочетание природных условий (климата, рельефа, почв, подстилающих пород, осадков, хозяйственной деятельности) создаёт возможность проявления эрозии почв при их сельскохозяйственном использовании. Наибольшее распространение в мире получила водная и ветровая эрозия почв, третье место занимает химическая деградация (загрязнение) почв [1].

При оценке негативного воздействия эрозии почв главное внимание уделяется потерям их плодородия и, как следствие, потерям урожая. При этом игнорируются другие последствия эрозии почв: заиление и загрязнение водоёмов, нарушение структуры ландшафта и снижение его устойчивости к негативным воздействиям и др. Миграция загрязняющих веществ и поступление их в водные объекты приводят к загрязнению водных объектов различными химическими элементами и соединениями. Одно из ведущих мест занимает

комплекс вопросов, связанных с эрозионно-аккумулятивной деятельностью, в том числе вопросы соотношения между эрозионной и транспортирующей способностью водных потоков и поступлением в реки твёрдого материала со склонов.

Методы исследования и подходы

Исследования проводили в пределах Московской и Владимирской областей с 1992 по 2012 гг. Несмотря на то, что для ряда территорий существует достаточно много экспериментальных данных о смыве почв по типам рельефа [2], для некоторых объектов эти данные отсутствуют. В этом случае степень проявления эрозии определяется по следующим шести группам: 1) очень слабая; 2) слабая; 3) умеренная; 4) значительная; 5) сильная; 6) катастрофическая (табл. 1) [3]. Также можно использовать логико-графическую схему эволюции склонов в ходе эволюционно-аккумулятивных процессов [4], которая показывает, что форма склонов является отражением этих процессов, а функция формы склона освещается посредством логического уравнения, описывающего связь отметок склона с их длиной.

Таблица 1

Балльная оценка морфометрических показателей рельефа

Категория уклона поверхности, град.	Коэффициент горизонтального расчленения, км/км ²	Глубина местных базисов эрозии, м	Балл	Интенсивность эрозионных процессов
0–1	0,0–0,5	0–15	1	очень слабая
1–3	0,6–1,0	15–50	2	слабая
3–8	1,1–1,5	50–100	3	умеренная
8–15	1,6–2,0	100–200	4	значительная
15–30	2,1–2,5	200–600	5	сильная
более 30	более 2,5	более 600	6	катастрофическая

Таблица 2

Интенсивность эрозионного процесса в зависимости от уклона, коэффициента горизонтального расчленения

Уклон поверхности земли	Коэффициент горизонтального расчленения	Интенсивность эрозионного процесса
0,00–0,02	0,0–0,5	очень слабая
0,02–0,05	0,6–1,0	слабая
0,05–0,08	1,1–1,2	умеренная
0,09–0,10	1,3–1,5	значительная
более 0,1	> 1,6	сильная

Примечание: коэффициент горизонтального расчленения поверхности – отношение длины горизонтали к прямой, соединяющей её концы.

На «ступенчатом» склоне, на котором чередуются пологие и крутые участки, возможность эрозии резко уменьшается, т. к. террасы поглощают энергию потока. Потенциальная опасность развития эрозии почв определяется крутизной и длиной склонов. Для условий орошения (табл. 2) разработаны градации интенсивности эрозионных процессов в зависимости от уклона и коэффициента горизонтального расчленения [5].

Многообразие и сложность почвенного покрова, его особое место в природе и агропромышленном комплексе требуют комплексной агроэкологической оценки и группировки для рационального использования земель. Для этих целей используются:

- данные мониторинга земель, базирующиеся на результатах последних землеустроительных, почвенных, геоботанических, гидрологических, агрохимических, эрозионных, фитосанитарных и других обследований и изысканий;
- сведения о размещении на этих землях сельскохозяйственных культур;
- информация о продуктивности земель за последние 3–5 лет;
- оценка характеристик эрозии в аномальных условиях.

При группировке земель необходимо соблюдать два принципа: множество почвенных разновидностей должно быть сведено к минимальному числу внутренне однородных групп; эти группы должны иметь существенные агроэкологические различия [6]. Для условий малых рек бассейна средней и верхней Оки выделены четыре категории земель, близких по рельефным, почвенно-эрозионным, гидрогеологическим и агротехническим условиям и по потребности в проведении мелиоративных работ (табл. 3). Водосборы малых рек бассейна средней и верхней Оки по большинству параметров являются типичными лесоаграрными ландшафтами центральной части Русской равнины.

Приведённые в таблице 3 данные показывают, что при оценке эрозионной опасности земель существенную роль в смывости почв играет экспозиция склонов. Механизм переноса загрязнителей и самоочищения определяется морфометрическими и гидрологическими характеристиками и гидрохимическим режимом водоёма, видами техногенного воздействия. Особая роль в процессах самоочищения рек принадлежит пойменным территориям. Пойма реки обычно делится на три части: прирусловую – наиболее крутую и расчленённую; центральную – более протяжённую, занимающую среднюю часть,

Таблица 3

Агроэкологическая оценка земель бассейна р. Любожихи (приток р. Оки)

Категория земель	Крутизна склона	Тип смывости почв, земли			
		Южная и западная экспозиция		Северная и восточная экспозиция	
средний многолетний смыв со склонов пахотных земель, м ³ /(га·год)					
1	< 3	несмытые и среднесмытые	менее 13	несмытые	менее 8
2	3–5	сильносмытые	13–25	средне- и сильносмытые	8–13
3	5–8	сильносмытые	более 25	сильносмытые	более 13
4	более 8	долинно-балочные и овражные земли	нет пашни	долинно-балочные и овражные земли	нет пашни

и притеррасную – наиболее заниженную и заболоченную часть с наличием стариц и озёр. Это определяет высокую сложность структуры их почвенного покрова. В системе экологического мониторинга речного бассейна учёт роли пойменных территорий – необходимое составное звено, которое позволит более рационально вести сельскохозяйственное использование пойм, который состоит в следующей последовательности: анализ площадного развития морфоэлементов поймы; анализ почвенно-растительного покрова пойм; анализ использования пойменных земель; анализ гидрологического режима пойменных территорий; анализ загрязнённости пойменных почв. При мониторинге возникает необходимость выделения эталонных бассейнов рек, более глубокого изучения формирования их экосистем, гидробиологического режима, определения продуктивности земель [7]. Существуют различные подходы к типизации рек на основе учёта закономерного изменения гидробиологических характеристик по течению реки и ландшафтных особенностей водосборных бассейнов рек.

Обсуждение результатов исследований

Реакция экосистем любого ранга зависит от того, в какой мере экологическое состояние окружающей среды адекватно условиям её гомеостаза, под которым понимается относительное динамическое постоянство состава и свойств внутренней структуры экосистемы [4]. Гомеостаз предполагает сохранение устойчивости экосистемы в условиях воздействия ряда факторов. При этом воздействие каждого фактора или их совокупности может быть оценено как минимальное, когда оно не вызывает реакции (возмущения) экосистемы, и максимальное, последствием которого может быть деградация экосистемы в целом или даже её гибель и переход по сути в новую экосистему. Диапазон между минимальным и максимальным уровнем воздействия факторов представляет собой предел толерантности экосистемы, т. е. тот диапазон изменения уровня воздействия, в пределах которого система способна за счёт своих адаптационных возможностей противостоять изменяющему её внутреннее состояние воздействию. По мнению [8], оптимальной на современном этапе является четырёхранговая оценочная структура, разработанная для экосистем [9]. Каждому интервалу, характеризующему реакцию живых организмов или экосистемы, должен соответствовать некоторый интервал, определяющий в заданных пределах изменение уровня внешнего

воздействия. В этой же четырёхранговой схеме его целесообразно градуировать в виде ряда воздействий: «слабое – умеренное – сильное – опасное». Нарушение равновесия эрозионно-аккумулятивных процессов при техногенной эволюции на территории бассейна вызывает изменения существующего баланса, которые проявляются в накоплении в водной системе органического и минерального вещества, увеличении темпов осадконакопления и оказывают прямое ухудшающее влияние на состав донных отложений.

Пики интенсивности седиментации сопровождаются пиками развития фитопланктонных сообществ и хорошо коррелируют с эрозионным поступлением органических и минеральных веществ [10]. При другом соотношении внешних факторов воздействие может иметь и улучшающий характер. Это особенно характерно для техногенно нагруженных территорий, когда эрозионный сток «разбавляет» загрязнённые наносы, поступающие с сопредельных, как правило, высоко урбанизированных земель. Это подтверждается нашими исследованиями по изучению загрязнения донных отложений рек тяжёлыми металлами и мышьяком. Так, в районе г. Ногинска содержание кадмия в донных отложениях (фракция менее 20 мкм) р. Клязьмы выше города составляло в 2003 г. 15,66 мг/кг, в городе – 11,43 мг/кг, ниже города – 7,28 мг/кг. Это объясняется тем, что поступление эродируемого материала в водные объекты способствует понижению концентраций тяжёлых металлов в донных отложениях посредством их разбавления более чистым материалом. Авторы располагают многими подобными примерами [11].

Влияние пойменных земель на состояние водных объектов также двояко. С одной стороны, широкие поймы являются улучшающим фактором. Осаждая большинство взвешенных частиц в период половодья, они способствуют улучшению экологической обстановки ниже по течению, т. е. снижают результирующую техногенного воздействия. Такие примеры многочисленны, и в этом главная экологическая роль пойм водных объектов. В то же время интенсивное сельскохозяйственное использование пойменных земель нередко приводит к ухудшению экологической ситуации нижележащих водных экосистем, когда накопившиеся загрязняющие вещества поступают в водотоки. Это, прежде всего, характерно для сельскохозяйственных территорий, где влияние промышленных сточных и коммунальных вод весьма незначительно.

Заключение

Состав и свойства донных отложений являются отражением всей совокупности процессов, происходящих на водосборе и в водоёме. В бассейнах с минимальным техногенным воздействием морфология склонов определяет транзит загрязнителей в пределах постоянных и временных водотоков. При наличии хорошо выделяемой поймы значительная часть загрязнителей может откладываться на последней в соответствующих погодных условиях, определяя тем самым её очищающую роль. В аномальные годы высоких паводков, интенсивного снеготаяния и ливневых осадков отложившийся на пойме загрязнённый грунт может поступать в водотоки, определяя пойму как источник поступления загрязнителей.

На территориях, в пределах которых ведётся интенсивная хозяйственная деятельность, искусственно созданная морфология склонов определяет состояние бассейна. При квалифицированно выполненных противоэрозионных мероприятиях сооружения обычно предохраняют водные бассейны от поступления в них загрязнителей. Отмечаются случаи уменьшения концентраций тяжёлых металлов в донных отложениях за счёт материала, поступившего с водосборной территории. При некавалифицированном отношении к противоэрозионным мероприятиям или при их отсутствии городские и поселковые агломерации, а также сельскохозяйственные угодья являются источниками поступления загрязнителей в водотоки.

Авторы выражают благодарность другу и коллеге, доктору биологических наук, профессору и просто хорошему человеку Анатолию Семёновичу Керженцеву, который 2 мая 2016 г. отпраздновал свой юбилей. Мы не можем не отметить долгие годы совместного плодотворного сотрудничества в рамках многочисленных российско-германских проектов. Юбиляр и его коллеги любезно предоставили нам возможность работать на опытном полигоне в бассейне реки Любожики – правый приток реки Оки. Полученные результаты в значительной степени приведены в вышеприведённой статье.

Литература

1. Керженцев А.С. Функциональная экология. М.: Наука, 2006. 259 с.
2. Моделирование эрозионных процессов на территории малого водосборного бассейна / Под ред. А.С. Керженцев, Р. Майснер. М.: Наука, 2006. 224 с.
3. Романова Э.П. Опыт мелиоративного картирования эрозионноопасных местностей зарубежных территорий //

Оценка и картирование эрозионно-опасных и дефляционно-опасных земель. М.: МГУ, 1973. С. 46–50.

4. Гаршинев Е.А. Эрозионно-гидрологический процесс. Теория и модели. Волгоград: ВНИАЛМИ, 1999. 196 с.
5. Мелиорация и водное хозяйство. Т. 6. Орошение: справочник / Под ред. Б.Б. Шумакова. М.: Колос, 1990. 415 с.
6. Киселева О.Е., Коломийцев Н.В. Противоэрозионное обустройство склоновых земель в бассейнах малых рек на основе ГИС-технологий // Природообустройство. 2010. № 1. С. 21–27.
7. Ткачев Б.П., Булатов В.И. Малые реки: современное состояние и экологические проблемы: аналитический обзор. Новосибирск, 2002. 114 с.
8. Экологические функции литосферы / Под ред. В.Т. Трофимова. М.: Изд-во МГУ, 2000. 432 с.
9. Виноградов Б.В., Орлов В.А., Снакин В.В. Биотические критерии выделения зон экологического бедствия России // Известия РАН. Серия географическая. 1993. № 5. С. 77–89.
10. Мизандронцев И.Б. Химические процессы в донных отложениях водоемов. Новосибирск: Наука. Сибирское отделение, 1990. 176 с.
11. Коломийцев Н.В., Корженевский Б.И. Комплексная оценка уровней техногенных воздействий на водные объекты // Мелиорация и водное хозяйство. 2014. № 5–6. С. 56–62.

References

1. Kerzhentsev A.S. Functional ecology. M.: Nauka, 2006. 259 p. (in Russian).
2. Modelling of erosion processes on the territory of a small catchment / Eds. A.S. Kerzhentsev, R. Maysner. M.: Nauka, 2006. 224 p. (in Russian).
3. Romanova E.P. Experience in reclamation mapping of erosion dangerous places in overseas territories // Evaluation and mapping of erosion-prone and deflation-dangerous lands. M.: MGU, 1973. P. 46–50 (in Russian).
4. Garshinev E.A. Erosion-hydrological process. Theory and models. Volgograd: VNIALMI, 1999. 196 p. (in Russian).
5. Irrigation and water management. T. 6. Irrigation: reference book / Ed. B.B. Shumakov. M.: Kolos, 1990. 415 p. (in Russian).
6. Kiseleva O.E., Kolomiitsev N.V. Erosion control arrangement of sloping lands in the basins of small rivers on the basis of GIS technologies // Prirodoobustroystvo. 2010. № 1. P. 21–27 (in Russian).
7. Tkachev B.P., Bulatov V.I. Small rivers: the current state and environmental problems: analytical survey. Novosibirsk, 2002. 114 p. (in Russian)
8. Ecological functions of lithosphere / Ed. V.T. Trofimov. M.: Izd-vo MGU, 2000. 432 p. (in Russian).
9. Vinogradov B.V., Orlov V.A., Snakin V.V. Biotic criteria of selection of Russian zones of ecological disaster // Izvestiya RAN. Seriya geograficheskaya. 1993. № 5. P. 77–89 (in Russian).
10. Mizandrontsev I.B. Chemical processes in the bottom sediments of water bodies. Novosibirsk: Nauka. Sibirskoye otdeleniye, 1990. 176 p. (in Russian).

Дизайн почвенных агрегатов: принципы создания и характеристика их экологической устойчивости

© 2017. Б. К. Сон¹, н. с., К. Ю. Хан², д. б. н., эксперт,

¹ Институт фундаментальных проблем биологии РАН, Пущино, 142290, Россия, Московская область, г. Пущино, ул. Институтская, 2,

² Ожский экологический фонд, 142290, Россия, Московская область, г. Пущино, ул. Институтская, 2,
e-mail: vson06@rambler.ru, khan@itaec.ru

Впервые создан дизайн почвенных агрегатов, характеризующий закономерности распределения структурных элементов, образованных из илистых и коллоидных частиц, в капсулах, сформированных из пылеватых и песчаных частиц почвы. Дизайн почвенных агрегатов определяется морфометрическими показателями высокодисперсных органо-минеральных частиц, величинами сил сцепления, возникающими между частицами, особенностями формирования в агрегатах гексагональных структурных ячеек многоступенчатого сложения, определяющими формирование природного облика, образа агрегата.

Ключевые слова: почва, агрегат, гумус, энергия.

Design of soil aggregates: the principles of creation and their environmental sustainability

B. K. Son¹, K. Yu. Khan²,

¹ Institute of Basic Biological Problems RAS, 2 Institutskaya St., Pushchino, Moscow region, Russia, 142290,

² Ecological Foundation of the Oka region, 2 Institutskaya St., Pushchino, Moscow region, Russia, 142290,
e-mail: vson06@rambler.ru, khan@itaec.ru

The design of soil aggregates was first created, it characterizes the patterns of distribution of structural elements formed from silty and colloidal particles in the compartments, formed from silty and sandy soil particles. Design of soil aggregates is determined by the morphometric parameters of finely dispersed organic particles, by the values of the adhesion forces between particles, by formation of aggregates of hexagonal structural units of the multistage addition, which determine the formation of the natural appearance of the image of the unit.

Formation of structural connections in soil aggregates is determined by excess of free energy on the surface of contact between soil particles and water. Contacts between soil particles decrease the surface between solid and liquid phases. Resultant decrease of surface energy corresponds to the energy of bonds between the particles. When micro-dispersed soil particles react with humus through exchange cations and ionized molecules of humus acids, the micro-heterogeneous crystals of calcium and magnesium humate set on the particle surface and form hydrophobic areas. The higher the free energy on the contact between solid and liquid soil phases is, the stronger the bond forming between the soil particles is. The sum of the forces in the contacts between soil particles determines the stability of soil aggregate structure.

Therefore, the bulk density of solid particles decreases and porosity of aggregates increases. The bonds are formed on contacts and hydrophobic areas on the surface of colloidal particles. Such bonds stretch during wetting and contract during drying. Volume of aggregates includes anisotropic pores which form micro-zones with different water content. To form such aggregates a high local concentration of highly disperse particles and humus is necessary; thus each colloid particle connects with 12 similar colloid particles. Such processes naturally are active in soil and all conditions to form hexagonal structures with highly dispersed particles are met. The process of aggregate formation is driven by decrease of free energy due to forming energy bonds between colloid particles.

Design of soil aggregates could be a basis for modeling new materials: by modifying their building blocks (highly disperse organo-mineral particles) artificial materials analogues to the natural structures can be created.

Keywords: soil, aggregate, humus, energy.

Создание научных основ получения нового поколения экологичных пластических материалов на основе исследования строения природных высокодисперсных органо-глинистых дисперсных структур является одним из приоритетных направлений как в области разработки новых материалов, так и охраны окружающей среды от загрязнения. К одним из таких природных образований, выполняющих фундаментальную роль в биосфере, относятся водоустойчивые агрегаты чернозёмов.

При взаимодействии почвенных частиц в контактах образуются структурные связи, определяющие практически все физико-механические свойства почв. Определению размеров структурных элементов, характеристике их физических и химических свойств, оценке сил сцепления между частицами, особенностям формирования в глинистой органоминеральной матрице гексагональных структурных ячеек многоступенчатого сложения, определяющих прочностные и деформационные свойства водоустойчивого агрегата, посвящено настоящее исследование.

Материалы и методы

Для исследования строения водоустойчивых ядер, в первую очередь, необходимо их извлечь из почвы, основываясь на количественных признаках, позволяющих надежно иден-

тифицировать водоустойчивое ядро от других структурных образований. Обусловлено это тем, что в почвах одновременно могут присутствовать не только водоустойчивые агрегаты, состоящие из водоустойчивых ядер, связанных друг с другом, но и водоустойчивые агрегаты, не содержащие водоустойчивых ядер. Последние образуются из микроагрегатов и элементарных почвенных частиц, не вовлечённых в процесс формирования водоустойчивых ядер. В почве также имеется определённое количество индивидуальных водоустойчивых ядер, не связанных или слабосвязанных друг с другом силами сцепления. Анализ кривых распределения водоустойчивых агрегатов по фракциям, основанный на концепции водоустойчивого ядра, позволил выявить на кривой следующие характерные области. Правая ветвь (а) кривой распределения характеризует агрегаты, образованные исключительно из водоустойчивых ядер, связанных друг с другом. Левая ветвь (б) кривой характеризует агрегаты, которые не содержат в своём составе водоустойчивых ядер, хотя они и водоустойчивы (рис.).

Максимум на кривой характеризует максимальное содержание отдельных, не связанных друг с другом водоустойчивых ядер, а размер ячеек сита, на котором аккумулируется максимальное количество индивидуальных водоустойчивых ядер, соответствует диаметру водоустойчивого ядра (рис.).

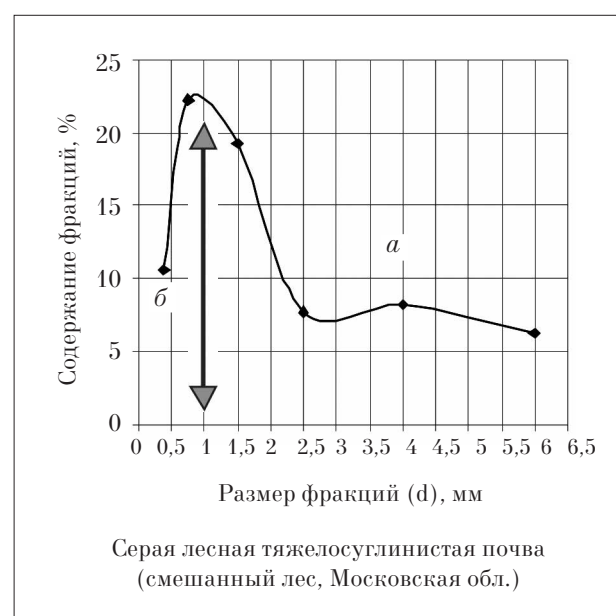
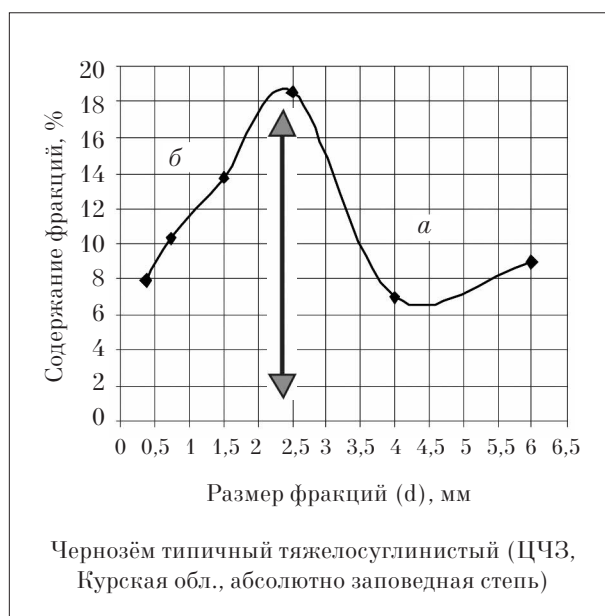


Рис. Распределение водоустойчивых ядер в агрегатах чернозёмных и серых лесных почв: а – область, характерная для агрегатов, образующихся из водоустойчивых ядер; б – область, характерная для водоустойчивых агрегатов, не содержащих водоустойчивые ядра; максимумы на кривых распределения соответствуют содержанию в почвах индивидуальных водоустойчивых ядер, которые свободны, не связаны между собой и не образуют ассоциаций

Таблица 1

Закономерности распределения водоустойчивых ядер и илистых частиц в агрегатах почв

Горизонт и глубина, см	Гумус, %	Агрегаты без ядер		Агрегаты с ядрами	
		количество, %	частицы < 1 мкм	количество, %	частицы < 1 мкм
Чернозём типичный мощный, абсолютно заповедный лес (ЦЧЗ, Курская обл.)					
Ад 2–10	9,1	43,8	13,6	56,2	21,1
А1 10–20	6,3	63,1	19,6	36,9	13,9
А1 20–40	4,2	75,9	23,5	24,1	9,0
А1 40–60	3,5	81,3	25,2	18,7	7,0
АВ 60–80	2,6	82,1	25,4	17,9	6,7
Вк 110–120	1,7	89,2	27,6	10,8	4,1

Отметим, что кривая, характеризующая распределение водоустойчивых агрегатов по фракциям, отражает особенности строения водоустойчивых агрегатов. Анализ кривых распределения позволяет обоснованно разделять водоустойчивые агрегаты, состоящие только из водоустойчивых ядер (ассоциированных и индивидуальных), от агрегатов водоустойчивых, но не содержащих водоустойчивые ядра. Рассматриваемый аспект важен в методическом отношении, так как он связан с процедурой подготовки водоустойчивых ядер для исследования.

В таблице 1 представлены данные, характеризующие закономерности распределения в чернозёмах типичных мощных агрегатов, образующихся из водоустойчивых ядер, и агрегатов, образующихся без водоустойчивых ядер. Первые практически не разрушаются при взаимодействии с водой, а вторые – размокают, разрушаются и распадаются. Эти различия определяются особенностями их структуры, зависящими от содержания в агрегатах гумуса и илистых частиц.

Для определения энергетических характеристик нами разработаны уникальные методы, которые апробированы при исследовании различных типов почв. Их описание дано в публикациях [1–3].

В результате теоретических исследований нами получена зависимость для определения энергии агрегатной структуры почв. Она равна работе, которую необходимо совершить для разрушения всех структурных связей агрегата. Она имеет следующий вид:

$$U = \frac{1}{2} u_k Z \cdot \frac{3k}{4\pi r^3 \rho_{str}} \cdot \frac{D}{D_0} \cdot P_{agr}$$

где u_k – энергия сцепления частиц в единичном контакте, Дж/контакт; Z – координа-

ционное число, при плотной гексагональной упаковке частиц в агрегатах оно равно 12; r – радиус илистых частиц, мм; ρ_b – плотность сложения водоустойчивого ядра, г/см³; ρ_{str} – плотность твёрдой фазы илистых частиц почв, г/см³; k – массовая доля структурных элементов, содержащихся в 1 г водоустойчивых ядер; D – диаметр водоустойчивых ядер, формирующийся в горизонтах почв с определённым содержанием в них гумуса, мм; D_0 – диаметр водоустойчивых ядер, образующихся в горизонтах почвы с максимальным содержанием в них гумуса, мм; P_{agr} – масса водоустойчивых ядер, содержащихся в 100 г воздушно сухой почвы, г.

Результаты и обсуждение

При взаимодействии почвенных частиц в контактах образуются структурные связи, определяющие практически все физико-механические свойства почв. Нами установлено, что высокодисперсные частицы, формирующие фракцию и имеющие размер 0,34 мкм, образуют гексагональную ячейку, характерную для первой ступени упаковки. В таблице 2 приведены параметры, характеризующие плотную гексагональную упаковку структурных элементов в водоустойчивых ядрах агрегатов почв. Эти данные являются базовыми для создания объёмного дизайна почвенных агрегатов.

В таблице 3 представлены базовые данные, характеризующие гексагональную упаковку высокодисперсных частиц в водоустойчивых агрегатах почв. Они позволят оптимизировать технологические процессы при создании искусственных агрегатов из высокодисперсных частиц, извлечённых из материнской породы почв, практически не содержащих в исходном

Таблица 2

Параметры, характеризующие плотную гексагональную упаковку структурных элементов в водоустойчивых ядрах агрегатов

Количество гумуса, $n \cdot 10^{-15}$ г/контакт	Объём гумуса, $n \cdot 10^{-16}$ см ³ /контакт	Размер гумусовых частиц, $n \cdot 10^{-6}$ см	Диаметр структурной ячейки, формирующейся из агрегированного комплекса коллоидных частиц, мкм			
			x_1	x_2	x_3	x_4
1,39	8,68	4,82	0,34	1,02	3,06	10,8

Таблица 3

Параметры, характеризующие плотную гексагональную упаковку частиц в агрегатах почв

Степень упаковки частиц (x)	Диаметр структурной ячейки (d_j), мкм	Граничное координационное число ($Z/4$)	Объём частиц в 1 см ³ каждой ступени упаковки, $(\rho_s/\rho_t) = T^x$	Число контактов в сечении каждой ступени упаковки, $\chi \cdot 10^9$
1	0,34	3	0,74	3,67
2	1,02	3	0,55	2,71
3	3,06	3	0,40	2,01
4	10,8	3	0,30	1,49

состоянии водоустойчивых агрегатов. Если в образовании агрегатов участвуют гумусовые вещества и высокодисперсные глинистые частицы, то образуются агрегаты водоустойчивые, характеризующиеся многоступенчатым сложением гексагональных ячеек в ядрах водоустойчивых агрегатов. Отметим, что нами впервые установлены закономерности изменения прочности гексагональных ячеек. Она может изменяться от 50 кгс/см² в воздушно сухом состоянии до 15 кгс/см² – во влагонасыщенном.

Для образования таких агрегатов необходима локальная концентрация высокодисперсных частиц и гумуса для того, чтобы каждый агрегированный комплекс коллоидных частиц мог соприкоснуться с 12 подобными частицами. Эти процессы протекают в почвах, и в ней создаются все условия для формирования рассмотренных структур с гексагональной упаковкой высокодисперсных частиц почвы. Самое главное – этот процесс протекает самопроизвольно, движущей силой его является закономерное уменьшение свободной энергии, связанное с образованием энергетических связей между коллоидными частицами почв.

Заключение

Таким образом, впервые создан дизайн почвенных агрегатов. Строение почвенных агрегатов определяется морфометрическими показателями высокодисперсных органо-минеральных частиц, величинами сил сцепления, возникающими между частицами, особенно

стями формирования в агрегатах гексагональных структурных ячеек многоступенчатого сложения, определяющими формирование природного облика, образа агрегата. Дизайн почвенных агрегатов – это проект, на основании которого можно создавать аналогичные естественным структурным образованиям новые материалы путём модифицирования их строительных блоков – высокодисперсных органо-минеральных частиц.

Литература

1. Хан К.Ю., Поздняков А.И., Сон Б.К. Строение и устойчивость почвенных агрегатов // Почвоведение. 2007. № 4. С. 450–456.
2. Хан К.Ю., Поздняков А.И., Сон Б.К. Метод определения сцепления в почвенных агрегатах // Почвоведение. 2007. № 7. С. 838–845.
3. Khan K.Yu., Pozdnyakov A.I., Son B.K. Fabric of soil and characterization of their structural functional stability // Eurasian Soil Science. 2008. V. 41. № 13. P. 1417–1423.

References

1. Khan K.Yu., Pozdnyakov A.I., Son B.K. The structure and stability of soil aggregates // Pochvovedenie. 2007. № 4. P. 450–456 (in Russian).
2. Khan K.Yu., Pozdnyakov A.I., Son B.K. The method for determining the adhesion of soil aggregate // Pochvovedenie. 2007. № 7. P. 838–845 (in Russian).
3. Khan K.Yu., Pozdnyakov A.I., Son B.K. Fabric of soil and characterization of their structural functional stability // Eurasian Soil Science. 2008. V. 41. № 13. P. 1417–1423.

Интегральный параметр критических нагрузок как основа экологического нормирования загрязнения ландшафтов тяжёлыми металлами

© 2017. С. А. Тобратов, к. б. н., доцент, руководитель лаборатории,
Рязанский государственный университет имени С. А. Есенина,
390000, Россия, г. Рязань, ул. Свободы, 46,
e-mail: tobratvsa@mail.ru

Предложен способ оценки ассимиляционного потенциала ландшафтов на основе допустимого накопления тяжёлых металлов (ТМ) в трёх средах: фитомассе, поверхностных водах и почвенном покрове. Подобно известному методу критических нагрузок (КН), предлагаемый способ направлен на выявление природных механизмов самоочищения экосистем от загрязняющих веществ и индикацию ранних стадий антропогенного химического загрязнения. Однако, в отличие от КН, предложенный метод учитывает экологическую роль депонирующей способности почвенного покрова, что позволяет дать значительно более объективную оценку ассимиляционного потенциала экосистем. В основу такой оценки положены экологические нормативы – верхние пределы природообусловленного накопления нормируемых элементов в природных средах, являющиеся альтернативой предельно допустимым концентрациям и устанавливаемые в ходе региональных эколого-геохимических исследований.

В отличие от ПДК, экологические нормативы (ЭН) являются динамическими величинами и позволяют учесть региональную геохимическую специфику, природную мозаичность почвенного покрова и даже многолетнюю эволюцию ландшафтов (например, при глобальном потеплении). Однако разработка ЭН требует создания значительной по объёму базы данных по почвенным концентрациям ТМ (в нашем случае – 325 пунктов, 1 точка опробования на 5–6 км²), что необходимо для выявления устойчивых генетических группировок почв при помощи кластерного анализа. Для каждой такой генетической группы в ходе вариационного анализа устанавливается ЭН – верхний природообусловленный предел накопления элемента, соответствующий уровню доверительной вероятности 99%. В дальнейшем применяется расчётная схема, позволяющая оценить допустимую скорость ежегодной аккумуляции ТМ в верхнем корнеобитаемом 0–20 см слое почв. Данное слагаемое суммируется с «классическим» двухкомпонентным вариантом КН, в результате чего рассчитывается предлагаемый нами трёхкомпонентный интегральный параметр критических нагрузок.

Показано, что гранулометрический состав является основным фактором эколого-геохимической устойчивости почв. Установлено, что для ландшафтных систем наиболее опасны элементы с высокой миграционной способностью и низкой биофильностью.

Ключевые слова: экологическое нормирование, критические нагрузки, тяжёлые металлы, геохимическая устойчивость ландшафтов.

Integral parameter of critical loads as a basis for environmental regulation of landscapes contamination with heavy metals

S. A. Tobratov,
Ryazan State University n.a. S. A. Yesenin,
46 Svoboda St., Ryazan, Russia, 390000,
e-mail: tobratvsa@mail.ru

The method of evaluation of landscape carrying capacity on the basis of the permissible limits for heavy metal accumulation in phytomass, surface waters and soils has been suggested. Like the already known method of critical loads (CL), the proposed method aims to identify natural mechanisms of ecosystem self-purification from pollutants and to indicate the early stages of anthropogenic chemical contamination. However, in contrast to CL, the proposed method takes into account the ecological role of depositing ability of the soil cover, which allows it to give a much more objective assessment of ecosystem carrying capacity. This assessment is based on ecological standards which are the upper limits of accumulation of regulated elements in environments, which are safe for environment. Ecological standards are the alternative to the maximum permissible concentrations (MPC) and are included in regional ecological-geochemical studies.

Compared to the MPC, environmental standards are dynamic parameters and thus they make it possible to take the regional geochemical specifics, natural patterns of soil cover and even years-long landscapes evolution into account (for instance, during

global warming). The development of ES requires a substantial database on HM concentrations in soil (in our case – 325 points, 1 soil sample for 5–6 km²) which is necessary to identify sustainable pedogenic groups by means of cluster analysis. When variance analysis is performed an environmental standard is set for each pedogenic group as the upper natural limit of HM accumulation, which corresponds to confidence probability limit of 99%. Further on a calculation algorithm is applied which allows to evaluate acceptable annual soil deposition of metal in the upper (0–20 cm) layer. The given number is summed up with the “traditional” two-component variant of CL, as a result the suggested three-component integral parameter of critical load is calculated. It has been shown that soil granulometric composition is a major factor of ecological and geochemical soil stability.

It has been found out that the elements with high migration ability and low biophilic properties have the greatest danger for landscape systems.

Keywords: environmental regulation, critical loads, heavy metals, landscape geochemical stability.

Традиционные подходы к оценке химического загрязнения на основе гигиенических нормативов (предельно допустимых концентраций – ПДК) имеют недостатки [1]. ПДК – нединамические величины, не позволяющие учесть вариации природных геохимических режимов. Они основываются на антропоцентрическом подходе (приоритет здоровья населения), а состояние подвергающихся загрязнению природных экосистем недооценивается. И это закономерно: ПДК устанавливаются для отдельных природных компонентов, что делает крайне затруднительной оценку состояния целостных систем. Превышение ПДК часто означает, что уже началась необратимая деградация экосистем, а её ранние стадии просто не были замечены.

Указанных недостатков лишен альтернативный подход – экологическое нормирование техногенеза на основе методологии критических нагрузок (КН), которая активно разрабатывается в рамках Конвенции ООН по трансграничному загрязнению воздуха. КН – максимальное поступление загрязняющих веществ, которое не сопровождается необратимыми изменениями в биохимической структуре и продуктивности экосистем в течение длительного времени (соответствует характерному времени сукцессий в лесных экосистемах – около 100 лет) [2]. Если поступление элемента не превышает КН, то экосистема перерабатывает его поток за счёт естественных буферных механизмов без разбалансировки геохимических равновесий.

При оценке устойчивости экосистем к антропогенному поступлению тяжёлых металлов (ТМ) используется упрощенное уравнение масс-баланса [3]:

$$M_{dep} = M_{upt} + M_{leach}, \quad (1)$$

где M_{dep} – общее поступление металла, M_{upt} – накопление металла в ежегодном приросте фоновой и/или культурной растительности, M_{leach} – вынос со стоком.

$$M_{upt} = G_{an} \cdot C_{backM}, \quad (2)$$

где G_{an} – годовая продукция биомассы, подвергающейся отчуждению при заготовках (древесина, товарная продукция агроценозов), C_{backM} – максимально допустимая концентрация металла (для агроценозов можно использовать ПДК, для лесных экосистем необходимо экспериментальное определение C_{backM} [1]).

$$M_{leach} = Q_{runoff} \cdot C_{waterMPL}, \quad (3)$$

где Q_{runoff} – годовой сток, $C_{waterMPL}$ – максимально допустимая (например, не превышающая ПДК) концентрация металла в воде.

Критическая нагрузка ТМ ($CL(M)$) рассматривается как верхний предел параметра M_{dep} . Соответственно, на основе (1) получается следующая модель:

$$CL(M) = M_{upt} + M_{leach}, \quad (4)$$

Смысл «классической» трактовки $CL(M)$ состоит в том, что все экзогенные элементы должны «перерабатываться» в процессе биогенной и абиогенной миграции. Однако такой двухкомпонентный подход не учитывает депонирующую способность почвенного покрова [1], что приводит к неоправданному занижению КН. Мы предлагаем следующий алгоритм учёта почвенно-геохимического вклада в ассимиляционный потенциал ландшафтов:

- сбор информации – почвенное опробование и лабораторные испытания;
- выявление и типизация фоновых почвенно-геохимических режимов;
- определение для генетических группировок почв верхнего предела природообусловленного накопления ТМ – экологического норматива (ЭН – альтернатива ПДК), превышение которого сигнализирует о ранних стадиях антропогенного загрязнения;
- сопоставление ЭН с текущим уровнем накопления элемента в почве и расчёт допустимого темпа депонирования ТМ.

Таблица 1

Экологические нормативы содержания ТМ в почвах Рязанской области и смежных регионов Центра России, мг/кг [1]

Почвенная группировка		Форма нахождения	Cu	Zn	Pb	Cd
Автоморфные	Песчаные	подвижная	0,24	6,0	3,7	0,055
		валовая	2,35	165,0	11,4	0,340
	Легкосуглинистые	подвижная	0,29	6,9	1,4	0,094
		валовая	18,20	114,0	15,5	0,315
	Средне- и тяжёло-суглинистые	подвижная	0,51	14,0	3,0	0,102
		валовая	23,50	(255,0) ¹	17,4	0,365
Торфяные		подвижная	0,32	2,45	5,4	0,078
		валовая	17,50	57,0	8,6	0,400
Аллювиальные суглинистые		подвижная	0,87	(27,3) ²	4,3	0,210
		валовая	28,00	214,0	40,0	0,440

Примечания. Формы нахождения ТМ в почвах: подвижная – экстракция ацетатно-аммонийным буфером с рН=4,8; валовая (несиликатная) – экстракция царской водкой. В скобках приведены экологические нормативы, превышающие соответствующие ПДК. Вместо них следует использовать гигиенические нормативы: ¹ – 220 мг/кг, при рН_{ксл} < 5,5 – 110 мг/кг (ОДК); ² – 23,0 мг/кг (ПДК).

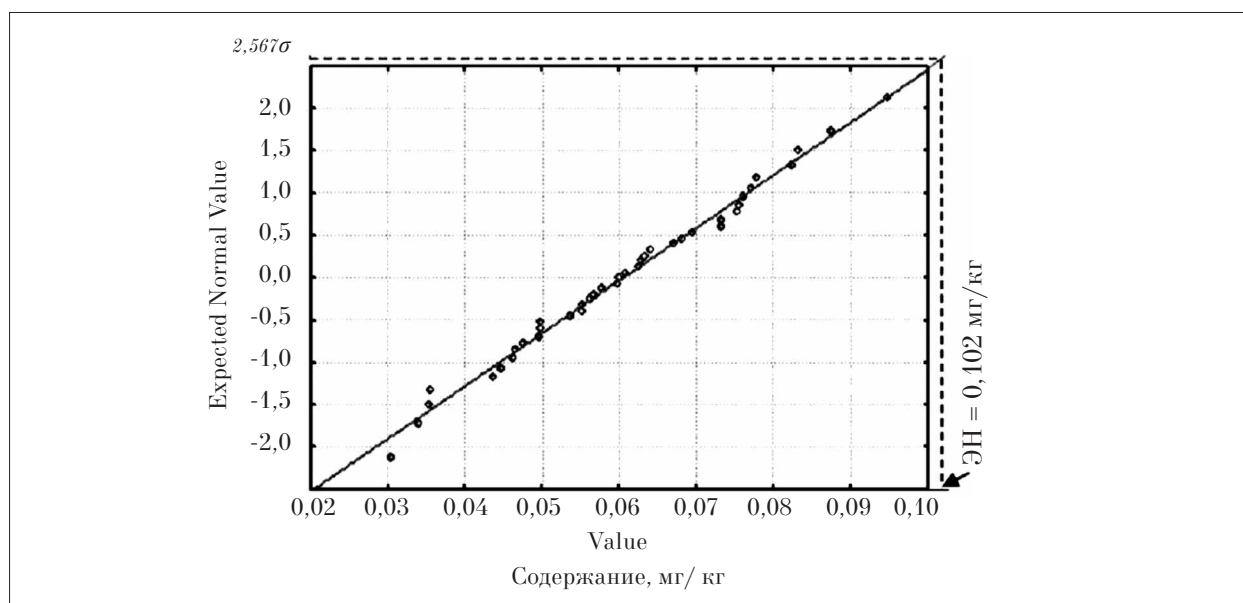


Рис. 2. Пример установления экологического норматива: концентрация подвижных форм кадмия в суглинистых почвах (уровень доверительной вероятности 99%)

В ходе полевых исследований на модельной территории в центре Рязанской области (на границе зон подтайги, широколиственных лесов и лесостепи) нами было отобрано 325 почвенных проб (1 проба на 5–6 км²), в которых определено содержание валовых несиликатных и подвижных форм Cu, Zn, Pb и Cd. Далее при помощи кластерного анализа (метод Варда, дистанции Евклида) определено наличие 4 фоновых почвенно-геохимических режимов, которые, как следует из рисунка 1 (см. обложка, с. 3), различаются в основном по особенностям гранулометрического состава, что типично для центра Русской равнины.

Для каждой из 4 типологических почвенных групп при помощи вариационного анализа [4] рассчитаны ЭН, в основу которых положены нормированные отклонения от среднего на уровне доверительной вероятности 99% (или $X \pm 2,576\sigma$; рис. 2, см. обложка, с. 3, и табл. 1). Вероятность превышения ЭН, определённого таким способом, в фоновых условиях пренебрежимо мала, а если превышение имеется, то оно, скорее всего, обусловлено техногенным влиянием.

При расчёте допустимого темпа депонирования ТМ в почве следует предусматривать возможность прогрессирующего накопления ТМ в подвижных формах и учитывать, что

данный темп не должен нарушать почвенно-геохимические равновесия на протяжении не менее 100 лет. Таким образом, получаем следующую модель:

$$SD(M)_{an(acc)} = \frac{\mathcal{E}H^{node} - C_i^{node}}{100} \cdot \rho \cdot 2000, \quad (5)$$

где $SD(M)_{an(acc)}$ – приемлемая интенсивность ежегодного депонирования ТМ (*acceptable annual soil deposition of metal*) в верхнем 0–20 см слое почвы, г/(га · год); $\mathcal{E}H^{node}$ – экологический норматив почвенных концентраций подвижных форм ТМ, мг/кг (табл. 1); C_i^{node} – фактическая концентрация подвижных форм ТМ в данной почве, мг/кг; ρ – плотность почвы в естественном сложении, т/м³; 2000 – коэффициент пересчёта на площадь.

Вышесказанное позволяет существенно дополнить концепцию критических нагрузок, введя понятие интегрального параметра КН $IPCL(M)$:

$$IPCL(M) = CL(M) + SD(M)_{an(acc)} = M_{upt} + M_{leach} + SD(M)_{an(acc)}. \quad (6)$$

Значения $IPCL(M)$, выраженные в удельных единицах допустимого поступления ТМ, позволяют планировать природопользование с учётом пространственных неоднородностей ассимиляционного потенциала (рис. 3, см. обложка, с. 3). Они определяют уровень

ежегодных выпадений ТМ, который гарантированно не приведёт к нарушению почвенно-геохимических равновесий, деградации биоблока и загрязнению природных вод. На рисунке 3 хорошо заметна мозаичность геохимической устойчивости ландшафтов, а также то, что для каждого элемента характерны уникальные пространственные черты такой устойчивости.

Как следует из рисунка 4, основным фактором геохимической устойчивости является биофильность элемента, в связи с чем наименее опасны для экосистем биофилы Cu и Zn. Кроме того, КН по «классической» модели (4) явно недоучитывает ассимиляционный потенциал ландшафтов, а параметр $SD(M)_{an(acc)}$ позволяет дать ему более объективную оценку. Особенно велик вклад $SD(M)_{an(acc)}$ для Pb (достигает 80% от $IPCL$), что объясняется способностью Pb к специфической адсорбции гумусовыми кислотами [5]. Впрочем, «запас прочности» геосистем к выпадениям Pb значительно ниже, чем биофильных Cu и Zn (рис. 4). Для наиболее подвижного [5, 6] и токсичного кадмия не только CL , но и $IPCL$ оказались ниже модуля атмосферных выпадений, что характеризует Cd как приоритетный загрязнитель ландшафтов региона.

Таким образом, предложенный нами трёхкомпонентный интегральный параметр критических нагрузок позволяет повысить объективность экологического нормирования антропогенного загрязнения и управленческих

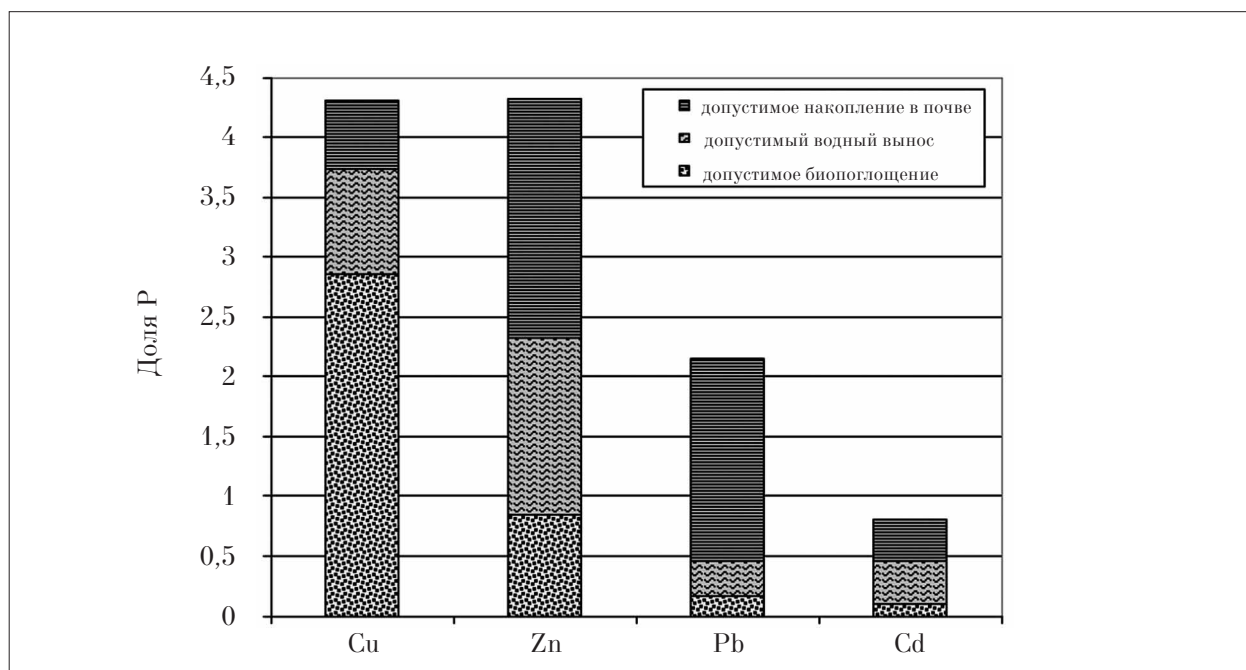


Рис. 4. Соотношение слагаемых $IPCL$ тяжёлых металлов в единицах их средерегиональной атмосферной поставки (P)

решений в сфере природопользования. Наименьшей опасностью для природных ландшафтов обладают биофильные элементы, способные накапливаться на почвенно-геохимических барьерах, а приоритетными загрязнителями являются миграционно активные токсиканты.

Литература

1. Кривцов В.А., Тобратов С.А., Водорезов А.В., Комаров М.М., Железнова О.С., Соловьева Е.А. Природный потенциал ландшафтов Рязанской области. Рязань: Изд-во РГУ им. С.А. Есенина, 2011. 760 с.
2. Manual on Methodologies and Criteria for Modeling and Mapping Critical Loads & Levels and Air Pollution Effects, Risks and Trends / UNECE Convention on Long-Range Transboundary Air Pollution. 2004. [Электронный ресурс] <http://www.icpmapping.org/> (Дата обращения 02.11.2016).
3. Охрана природы. Городские экосистемы. Расчёт величин критических нагрузок загрязнителей на городские экосистемы. Методические рекомендации. Москва – Смоленск: Маждента, 2004. 56 с.
4. Пузаченко Ю.Г. Математические методы в экологических и географических исследованиях. Москва: Академия, 2004. 416 с.
5. Ладонин Д.В., Марголина С.Е. Взаимодействие гуминовых кислот с тяжёлыми металлами // Почвоведение. 1997. № 7. С. 806–811.

6. Линник П.Н., Набиванец Б.И. Формы миграции металлов в пресных поверхностных водах. Л.: Гидрометеоиздат, 1986. 268 с.

References

1. Krivtsov V.A., Tokratov S.A., Vodorezov A.V., Komarov M.M., Zheleznova O.S., Solov'eva E.A. Natural potential of Ryazan region landscapes. Ryazan: Izd-vo RGU im. S.A. Esenina, 2011. 760 p. (in Russian).
2. Manual on Methodologies and Criteria for Modeling and Mapping Critical Loads & Levels and Air Pollution Effects, Risks and Trends / UNECE Convention on Long-Range Transboundary Air Pollution. 2004. [Electronic resource] <http://www.icpmapping.org/> (Date of the application 02.11.2016).
3. Nature protection. Urban ecosystem. Calculation of critical loads of pollutants in urban ecosystems. Methodical recommendations. Moscow – Smolensk: Mazhdenta, 2004. 56 p. (in Russian).
4. Puzachenko Yu.G. Mathematical methods in ecological and geographical studies. M.: Akademiya, 2004. 416 p. (in Russian).
5. Ladonin D.V., Margolina S.E. Interaction of humic acids with heavy metals // Pochvovedenie. 1997. № 7. P. 806–811 (in Russian).
6. Linnik P.N., Nabivanets B.I. Forms of metal migration in fresh surface waters. Leningrad: Gidrometeoizdat, 1986. 268 p. (in Russian).

Эволюция почв в связи с современным потеплением климата

2017. О. И. Худяков, в. н. с., д. б. н., О. В. Решоткин, н. с., к. б. н.,
Институт физико-химических и биологических проблем почвоведения РАН,
142290, Россия, Московская обл., г. Пушкино, ул. Институтская, 2,
e-mail: oix@rambler.ru

В связи с потеплением анализируется современное состояние климата относительно климатической нормы. В количественном выражении климатическая норма является характеристикой любого параметра климата атмосферы или почвы, взятой за период 1961–1990 гг. в суточном, декадном, месячном, сезонном и среднемноголетнем циклах. В настоящее время изменения климата отмечаются на глобальном, континентальном и региональном уровнях. На глобальном уровне особенно сильное потепление климата отмечается за последние 100 лет, когда средняя десятилетняя температура воздуха повысилась от минимальных своих значений (1891–1900 гг.) до настоящего времени на 1,2–1,3 °С. Современное потепление затронуло все континенты, при этом температура воздуха на континентах повысилась, относительно климатической нормы, на 0,3–1,5 °С.

Анализ изменения климата на региональном уровне проведён за период экспериментальных наблюдений (1921–2015 гг.) на примере почв зонального ряда Европейской территории России: торфянистый глеезём лесотундры, подзолистые почвы средней тайги, дерново-подзолистые почвы южной тайги и светло-каштановые почвы сухой степи. Установлено, что каждой почве характерна определённая норма климатических параметров. Для исследованного зонального ряда почв показано, что современное потепление климата сопровождается увеличением температуры воздуха и почв и как следствие этого смещением почвенно-климатических зон в северном направлении. Современное потепление климата по температурному параметру стало соизмеримо с климатическим оптимумом голоцена. Создаются благоприятные условия для продвижения лесных сообществ к северу, что возможно приведёт к развитию подзолистого типа почвообразования на занятых лесом тундровых территориях. Для лесных почв северной и средней тайги в условиях современного потепления климата почвообразование будет сопровождаться ослаблением подзолистого и усилением дернового почвообразовательного процесса. Для светло-каштановых почв сухих степей можно ожидать усиление аридизации и связанных с ней процессов засоления почв.

Ключевые слова: эволюция почв, климат почв, климатическая норма, потепление климата.

Soil evolution in relation to modern climate warming

O. I. Khudyakov, O. V. Reshotkin,
Institute of Physicochemical and Biological Problems in Soil Science RAS,
2 Insitutskaya, Pushchino, Moscow region, Russia, 142290,
e-mail: oix@rambler.ru

In connection with warming, the current state of the climate relative to the climate normal is analyzed. In quantitative terms, the climate normal is a parameter of any characteristic of climate of atmosphere or soil sampled from 1961 to 1990 in a daily, ten-day, monthly, seasonal, or annual cycle. Currently, climatic changes occur on global, continental and regional level. On the global level, especially strong climate warming has been observed over the past 100 years: the average ten-year air temperature increased, as compared with its lowest (1891–1900), by 1.2–1.3 °C by now. Modern warming has affected all continents, while the air temperature on the continents has increased, as compared with the climate normal, by 0.3–1.5 °C.

Analysis of climate change on the regional level was carried out during the period of experimental observations (1921–2015) by the example of soils in the zonal range of the European part of Russia: peat gleyzems of forest-tundra, podzolic soils of middle taiga, sod-podzolic soils of southern taiga, and light-chestnut soils of dry steppe. It is established that each soil is characterized by a certain normal of climatic parameters. For zonal series of soils under research it was shown that the current climate warming is accompanied by the increase in air and soil temperature and, consequently, by displacement of soil-climatic zones in the north. The current climate warming, according to the temperature parameter, has become commensurate with the climatic optimum of the Holocene. Favorable conditions are created for promotion of forest communities to the north, which may lead to development of a podzolic type of soil formation in forest-occupied tundra territories. For forest soils of the northern and middle taiga, under conditions of the current climate warming, soil formation will be accompanied by weakening podzolic soil and intensification of sod soil-forming processes. One can also expect increase in aridization and salinization of chestnut soils of dry steppes.

Keywords: soil evolution, soil climate, climate normal, climate warming.

В настоящее время проблема климатической эволюции почв приобрела значительную актуальность. Ранее считалось, что климат, в связи с медленной его изменчивостью в историческом аспекте, не оказывает определяющего влияния на эволюцию почв [1]. Однако наложение природного потепления климата на продукты производственной деятельности человека (и в первую очередь углекислый газ) достаточно быстро привели к потеплению климата или так называемому парниковому эффекту [2, 3].

По В. В. Докучаеву климат является одним из факторов почвообразования. Климат, как экологический фактор, определяет развитие биологических, химических, физических и множество других процессов в образовании и жизни почвы как биокосного тела природы. Он определяет развитие процессов почвообразования на планетарном уровне, на уровне формации, на зональном уровне и на уровне биопеdocеноза. В этой связи особую роль играет климат в условиях современного потепления, которое стало соизмеримо с палеоклиматическим голоценовым оптимумом [4]. В настоящее время проблема современного потепления климата приобретает особую актуальность вследствие возможных глобальных изменений климата в ближайшие 25–50 лет. Определение возможной эволюции каждой зональной почвы стало одной из основных проблем генетического почвоведения. Основной причиной этого является чрезвычайно быстрое потепление климата на глобальном, континентальном и региональном уровнях [5].

Задача исследования: анализ изменений температурного режима почв и их влияния на возможную эволюцию (развитие) почв природных зон Европейской территории России.

Объекты и методы исследования

Объектами исследования являются почвы различных природных зон Европейской территории России: торфянистый глеезём лесотундры, подзолистые почвы средней тайги, дерново-подзолистые почвы южной тайги и светло-каштановые почвы сухой степи. Климатические условия формирования почв характеризуются данными наблюдений за температурой воздуха и температурой почвы на глубинах от 20 до 320 см на метеостанциях Петрунь, Петрозаводск, Кострома и Элиста.

В основу характеристики климата почвы нами предложена климатическая норма (КН). Климатическая норма – это средняя величина

любого параметра климата, взятая за период 1961–1990 гг. [6, 7]. В экологическом почвоведении КН – это экологический стандарт формирования каждой почвы, относительно которого анализируется динамика температуры воздуха, почвы и осадков в многолетнем и сезонном циклах. Кроме того, КН параметров климата рассматривается как базовая характеристика условий почвообразования зональной почвы и изменчивости климата во времени. Исходную климатическую информацию брали из справочника по климату СССР [8], веб-сайта ВНИИГМИ-МЦД [9] и из Оценочного доклада об изменениях климата и их последствиях на территории Российской Федерации [3].

Результаты и обсуждение

Современное потепление климата носит глобальный, континентальный и региональный характер.

Глобальное изменение климата. За время экспериментальных наблюдений температурный параметр климата носит колебательный характер, при котором периоды похолодания сменяются периодами потепления, при этом отмечается общий тренд повышения температуры воздуха, в котором можно выделить две особенности колебания. Первая особенность заключается в том, что колебания температуры отмечаются, когда средняя температура воздуха была ниже климатической нормы. Холодный период отмечается от начала экспериментальных наблюдений до 1980 г. Период похолодания сменился современным периодом потепления (1980–2015 гг.). В этот период среднедесятилетняя температура воздуха превысила глобальную климатическую норму к 2000 г. на 0,7 °С. Таким образом, за период наблюдений отмечается общий тренд устойчивого повышения глобальной температуры воздуха от минимальных её значений до современной температуры на 1,26 °С, что соответствует климатическому оптимуму палеоклимата голоцена [4, 10].

Изменение климата континентов. Современное потепление климата на всех континентах сопровождается повышением температуры воздуха от 0,3 до 1,5 °С, вызвав те или иные экологические последствия (табл.).

Изменение климата регионов анализируется на примере изменения климата Европейской территории России [3, 6, 7, 11, 12].

За последние 100 лет, по данным сети Росгидромета, потепление климата в среднем

по России составило 1,29 °С при среднем глобальном потеплении на 0,74 °С. За период наблюдений похолодание климата на территории России продолжалось от начала наблюдения (1880 г.), когда средняя температура воздуха была ниже КН на 0,8 °С до 1980 г., когда температура воздуха стала соответствовать КН. За период 1976–2006 гг. среднее потепление по России составило 1,33 °С. Сравнение динамики температуры воздуха территории России с ходом температур на континентальном и глобальном уровнях показывает абсолютную их синхронность при общей закономерности, при которой потепление климата приходится на 80-е гг. прошлого столетия, когда температура воздуха превысила климатическую норму.

Климатическая норма температуры воздуха. В зональном ряду почв Европейской территории России КН температуры воздуха изменяется в диапазоне от -4,4 до 9,8 °С. В зоне

распространения мерзлотных почв лесотундры КН температуры воздуха отрицательная. Своих максимальных положительных значений среднедесятилетняя температура воздуха достигает в зоне распространения почв сухой степи (рис. 1).

За период от начала экспериментального наблюдения за температурой воздуха сухих степей период похолодания, когда температура воздуха была ниже КН, продолжался до 60–70-х гг. Для почв таёжных и лесотундровых территорий период похолодания продолжался до 70–80-х гг. прошлого столетия. Для почв сухих степей период похолодания сменился периодом, когда температура воздуха соответствовала КН (1970–1990 гг.). В таёжных и тундровых территориях период похолодания окончился в 80-х годах. Для лесотундровых территорий повышение температуры воздуха отмечается в отрицательном диапазоне

Таблица

Изменение температуры воздуха по континентам и его последствия [2]

Континент, океан, регион, город	Повышение температуры относительно климатической нормы, °С	Экологические последствия в связи с потеплением
Азиатский: Китай, Индия, Пакистан	От 0,8 до 1,5	На континенте увеличились площади аридных и пустынных зон, снизился сток рек. В Пакистане реки практически пересохли
Европейский	От 1,2 до 1,4	Засухи в Испании, Франции, наводнения в Германии, Чехии, Словакии, в странах бассейна р. Дунай
Американский	От 0,6 до 0,8	Увеличение штормов, тайфунов. В летнее время увеличился межосадковый засушливый период (засуха)
Антарктида	От 0,5 до 1,5	Таяние льда, изменение ледовой обстановки. Поступление огромных масс талой воды в Мировой океан
Арктика	От 1,0 до 1,5	Уменьшилась ледовая обстановка и большая часть Северного Ледовитого океана стала проходимой для кораблей. Снизилась ледовая обстановка вокруг Канады и Исландии. В морях стали разваливаться айсберги и таять паковые льды. На побережье Северного Ледовитого океана происходит таяние вечной мерзлоты, появляются байджерахи и солифлюкция
Повышение температуры Мирового океана	От 0,6 до 1,2	Привело к более быстрому обмену между тёплыми и холодными водами, что привело к более частым тайфунам
Тёплое течение Гольфстрим	Проникло на 500–800 км в Арктику	Нарушение ледовой ситуации на Северном Ледовитом океане изменило скорости течения воды
Россия: европейская часть, Азия: Чукотка, Дальний Восток, Сибирь	От 0,3 до 0,4	Изменились зимние климатические условия. Увеличилась глубина сезонного протаивания почвы. Изменилась циклональная активность, ослаблен зимний Сибирский антициклон
Москва	до 2,5	За 125 лет регулярных климатических исследований среднегодовая температура воздуха повысилась с 3,5 до 6,0°С [12]
Прогноз по осадкам	Увеличение в северных и центральных районах и уменьшение в южных	

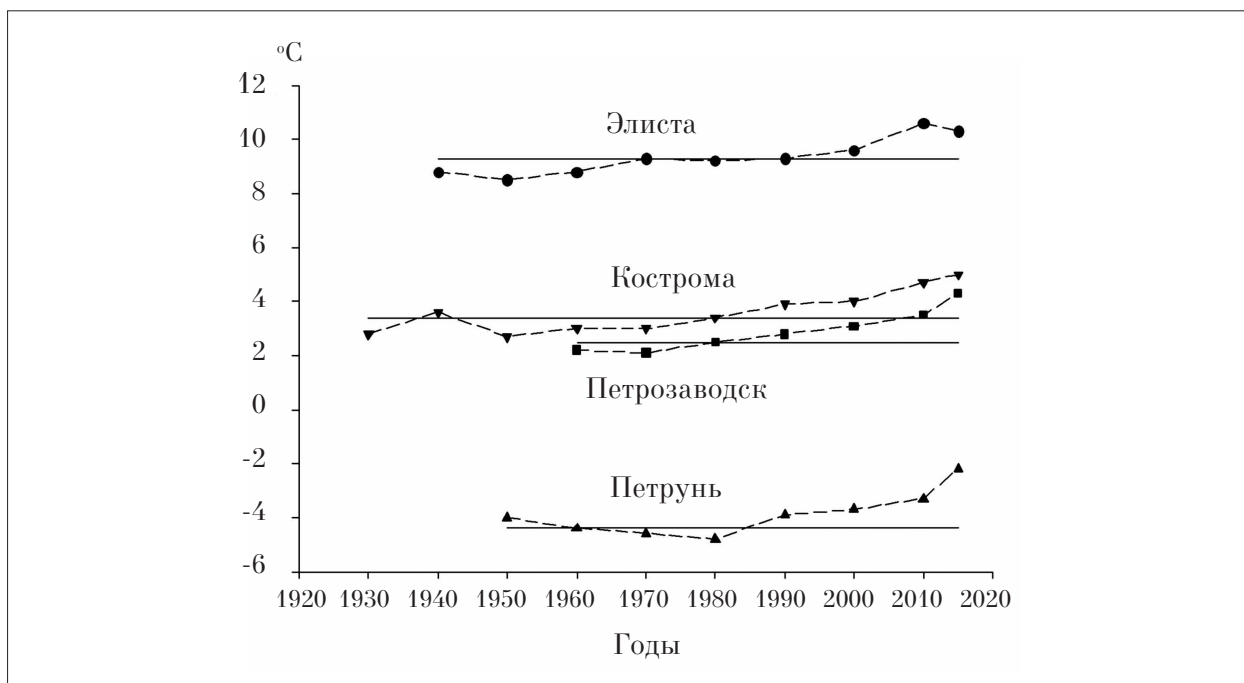


Рис. 1. Динамика температуры воздуха (пунктирная линия) относительно климатической нормы (сплошная линия) по метеостанциям: Петрунь (лесотундра), Петрозаводск (средняя тайга), Кострома (южная тайга), Элиста (сухая степь)

температур. Это свидетельствует о том, что потепление климата отмечается в холодный период года.

Температурный режим почв Европейской территории России. В качестве базовой температуры формирования зональных почв Европейской территории России используется КН температурного параметра климата почвы. Для каждой зональной почвы характерна строго определенная КН температурного параметра. В зональном ряду КН среднегодовой температуры почвы на глубине 20 см изменяется от 0,8 °С в торфянистых глеезёмах лесотундры до 11,8 °С в светло-каштановых почвах сухих степей.

Глубина проникновения температуры 10 °С в вегетационный сезон изменяется от 70 см в почвах лесотундры до 320 см в почвах южной тайги. В почвах сухих степей температура 10 °С проникает на глубину ниже 320 см. В почвах южной тайги отмечается термоизоплета 15 °С, КН её проникновения в почву достигает 75 см. Самыми тёплыми почвами зонального ряда являются почвы сухих степей, в которых отмечаются температуры 20 и 25 °С (рис. 2).

Для почв зонального ряда Европейской территории России потепление климата в первое десятилетие XXI века сопровождается накоплением в них тепла. В почвах уменьшается глубина сезонного промерзания и длительность нахождения в мёрзлом состоянии,

о чем мы судим по глубине сезонного проникновения нулевых температур в почву по отношению их к КН. Глубина проникновения температуры 0 °С за период 2001–2010 гг. существенно уменьшилась относительно КН во всех почвах кроме почв южной тайги. Особенно значительно она уменьшилась в песчаных почвах лесотундры, а в почвах сухих степей температура 0 °С на глубине 20 см и ниже за период 2001–2010 гг. вообще не наблюдается.

Заключение

Для каждой почвы Европейской территории России характерна строго определённая КН параметров климата атмосферы и почвы, относительно которой анализируется современное изменение климата.

Для почв ЕТР общий тренд потепления климата отмечается в последние тридцать пять лет (1980–2015 гг.), когда отмечается устойчивое повышение температуры воздуха, сопровождающееся смещением климатических зон по температурному параметру в северном направлении, при котором в период современного климатического потепления почвы лесотундры формируются в температурных условиях, характерных для условий северной тайги. Для почв лесотундры в сезонном цикле современное потепление климата, относительно КН, отмечается в холодный период года,

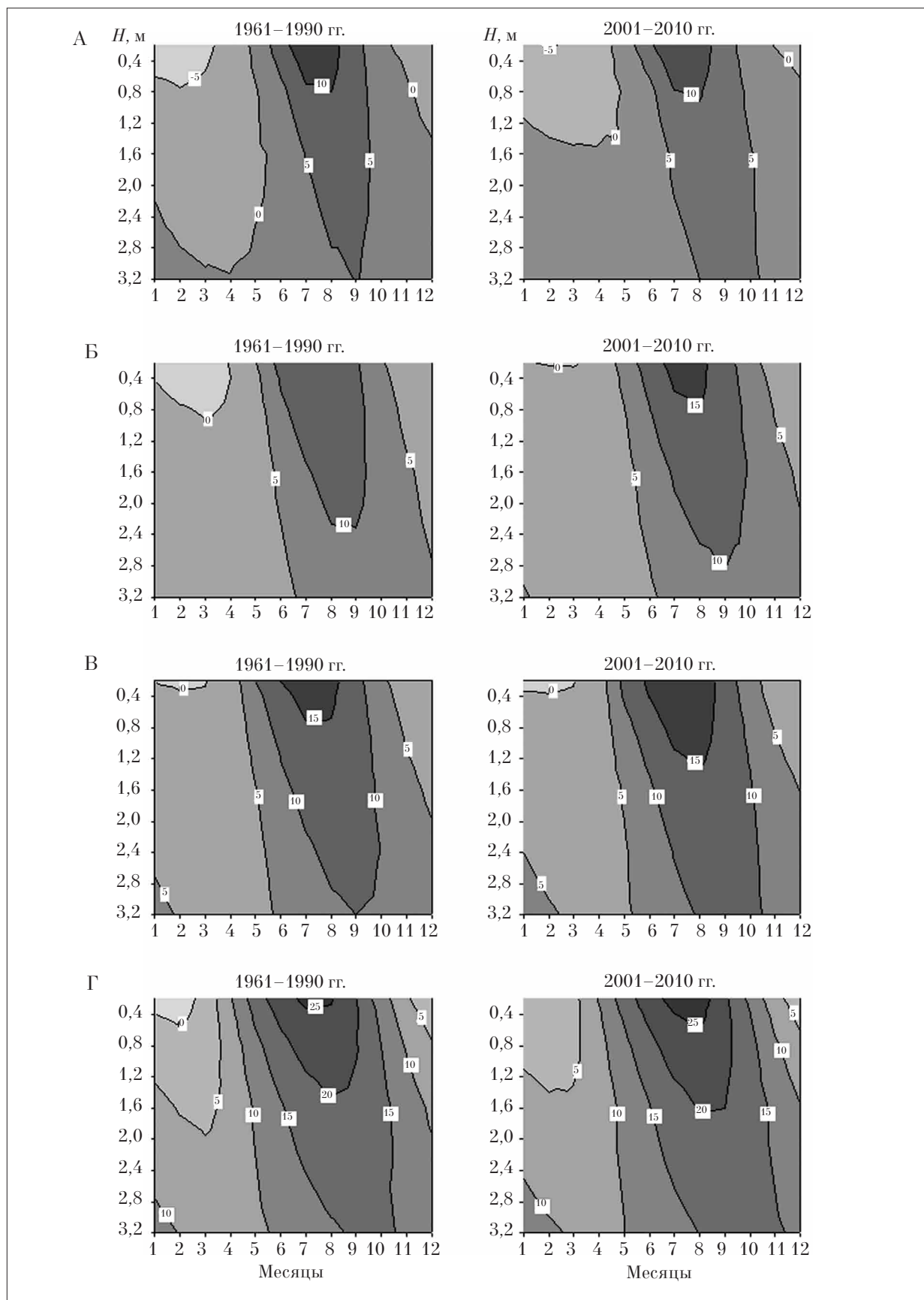


Рис. 2. Температура почв (средняя за период 2001–2010 гг.) почвенно-климатических зон относительно климатической нормы (1961–1990 гг.). А – торфянистый глеезём лесотундры (Петрунь), Б – подзолистая почва средней тайги (Петрозаводск), В – дерново-подзолистая почва южной тайги (Кострома), Г – светло-каштановая почва сухой степи (Элиста)

что способствует меньшему выхолаживанию почвы в холодный период года. В тёплый период года потепление климата в условиях КН осадков сопровождается повышением температуры почвы, что создает благоприятные условия для продвижения лесных сообществ к северу, что приведет к появлению на занятых лесом тундровых территориях подзолистого типа почвообразования, характерного почвообразованию в северной тайге.

В период потепления, когда средняя десятилетняя температура воздуха приближается к верхнему пределу КН или превышает его, подзолистые почвы средней тайги формируются в условиях, характерных для дерново-подзолистых почв, формирующихся в условиях южной тайги. Учитывая то, что потепление климата происходит при осадках, соответствующих КН, можно предположить ослабление подзолистого и усиление дернового почвообразовательного процесса.

Для почв сухих степей хорошо обеспеченных теплом территорий, эволюция почв связывается с изменением атмосферного увлажнения. За период экспериментальных метеонаблюдений для светло-каштановых почв современное потепление климата сопровождалось колебанием осадков в пределах КН, в то время как по температурному параметру отмечается устойчивый тренд потепления, при котором среднесемидесятилетняя температура воздуха за период 2001–2010 гг. превысила КН на 1,2–1,3 °С и стала соизмерима с температурой пустынных почв. В этом случае можно ожидать усиление аридизации и связанных с ней процессов засоления светло-каштановых почв.

Литература

1. Добровольский Г.В., Куст Г.С. Основные пути и методы прогноза эволюции почв под влиянием глобальных изменений климата // Вестник Московского ун-та. Сер. 17. Почвоведение. 1994. № 2. С. 3–14.
2. Всемирная конференция по изменению климата (Москва, 2003): Труды конф. М., 2004. 620 с.
3. Оценочный доклад об изменениях климата и их последствиях на территории Российской Федерации. Общее резюме. М.: Росгидромет, 2008. 29 с.
4. Хотинский Н.А. Голоцен Северной Евразии. М.: Наука, 1977. 200 с.
5. Фолланд К., Паркер Д. Мониторинг глобального климата и оценивание изменений климата // Всемирная конф. по изменению климата: Труды конф. М., 2004. С. 76–90.
6. Худяков О.И., Решоткин О.В. Динамика климата южных чернозёмов Западной Сибири в связи с потеплением // Известия Самарского научного центра РАН. 2012. Т. 14. № 1 (8). С. 2092–2095.

7. Худяков О.И., Решоткин О.В. Динамика температуры песчаных и суглинистых почв лесотундры Полярного Урала в связи с потеплением климата // Почвоведение 2014. № 12. С. 1467–1482.
8. Справочник по климату СССР. Вып. 1, 3, 13, 29. Метеорологические данные за отдельные годы. Ч. VIII. Температура почвы.
9. Всероссийский научно-исследовательский институт гидрометеорологической информации – Мировой центр данных [Электронный ресурс] <http://www.meteo.ru>.
10. Хромов С.П., Мамонтова Л.И. Метеорологический словарь. Ленинград: Гидрометеиздат, 1974. 568 с.
11. Горячкин С.В. Влияние изменения природной среды и климата на северные регионы // Региональные аспекты развития России в условиях глобальных изменений природной среды и климата. М.: НИЦЭНА, 2001. С. 125–132.
12. Сенников В.А., Россинская Т.М. Изменение климата по 125-летним наблюдениям метеорологической обсерватории им. М.В. Михельсона // Всемирная конф. по изменению климата: Тез. докл. М., 2003. С. 453.

References

1. Dobrovolskiy G.V., Kust G.S. The main ways and methods of forecast of soil evolution under the influence of global climate change // Vestnik Moskovskogo un-ta. Ser. 17. Pochvovedeniye. 1994. № 2. P. 3–14 (in Russian).
2. Proceedings of the World Climate Change Conference (Moscow, 2003). M., 2004. 620 p. (in Russian).
3. Assessment report on climate change and its consequences in Russian Federation. General Summary. M.: Roshydromet, 2008. 24 p.
4. Khotinskiy N.A. The Holocene of Northern Eurasia. M.: Nauka, 1977. 200 p. (in Russian).
5. Folland C., Parker D. Monitoring of global climate and assessment of climate change // Proceedings of the World Climate Change Conference. M., 2004. P. 76–90 (in Russian).
6. Khydyakov O.I., Reshotkin O.V. Climate dynamics of southern chernozems in Western Siberia due to climatic warming // Izvestiya Samarskogo nauchnogo tsentra RAN. 2012. V. 14. № 1 (8). P. 2092–2095 (in Russian).
7. Khydyakov O.I., Reshotkin O.V. Dynamics of the temperature in sandy and loamy forest-tundra soils of the Polar Urals in relation to climate change // Eurasian Soil Science. 2014. V. 47. № 12. P. 1245–1258.
8. Reference book on climate of the USSR. Issue 1, 3, 13, 29. Meteorological data on separate years. Part VIII. Soil temperature. (in Russian).
9. All-Russian Scientific Research Institute of Hydro-meteorological Information – World Data Center [Electronic resource] <http://www.meteo.ru> (in Russian).
10. Khromov S.P., Mamontova L.I. Meteorological dictionary. Leningrad: Gidrometeoizdat, 1974. 568 p. (in Russian).
11. Goryachkin S.V. The influence of environmental and climate changes on northern regions // Regionalnye aspekty razvitiya Rossii v usloviyakh globalnykh izmeneniy prirodnoy sredy i klimata. M.: NTsENA, 2001. P. 125–132 (in Russian).
12. Sennikov V.A., Rossinskaya T.M. Climate changes according to 125-year-long observations at the Mikhelson weather station // Vsemirnaya konferentsiya po izmeneniyu klimata. Tez. dokl. M., 2004. P. 453 (in Russian).

Отклик целостной экосистемы на потепление климата

© 2017. Н. Н. Зеленская, к. г. н., в. н. с.,

Институт фундаментальных проблем биологии РАН,
142290, Московская обл., г. Пущино, ул. Институтская, 2,
e-mail: zelen_1@rambler.ru

Оценен отклик функциональных параметров (продуктивность, соотношение доминантов) изолированной лугово-степной экосистемы на потепление климата. Показано, что расположенная на северо-западном пределе ареала лугово-степная экосистема «До́лы» (Московская обл., Приокско-Террасный заповедник) за годы глобального потепления приблизилась по важнейшим структурным и количественным характеристикам к луговой степи в Курской области.

Продуктивность степной экосистемы «До́лы» возросла за период 1998–2011 гг. более, чем на 30%, по сравнению с периодом 1975–1985 гг. Проективное покрытие доминантных злаков составляет сейчас 17%. В период потепления доминируют ковыль и типчак. Даже в наиболее мезофитном сообществе в последние годы наблюдается переход от доминирования тимopheевки к доминированию типчака.

Таким образом, в период потепления экосистема по своим функциональным параметрам – продуктивности и проективному покрытию доминантных злаков – стала ближе к эталонной луговой степи.

Ключевые слова: экосистема, функционирование экосистем, изменение климата, луговые степи, Приокско-Террасный биосферный заповедник.

The response of holistic ecosystem to climate warming

N. N. Zelenskaya,

Institute of Basic Biological Problems, Russian Academy of Sciences,
2 Institutskaya St., Pushchino, Moscow region, Russia, 142290,
e-mail: zelen_1@rambler.ru

The “Doly” ecosystem in the Prioksko-Terrasny Biosphere Reserve (PTBR) is the most north-western site of the meadow steppes. We studied the changes in functional parameters of the ecosystem under the influence of global warming. In the Southern Moscow Region the global warming has manifested itself in the average annual air temperature increase of about 2 degrees. Despite the aridization of climate the annual aboveground production of steppe ecosystem “Doly” has increased by more than a third over the period from 1998 to 2011, reaching 330 g/m². It is important to know the contribution of the dominant species in the grass cover, since the ecosystem is affected by the Oka river floods once in 40 years. The mesophytic association *Phleum phleoides* – (*Festuca valesiaca*) – multigrass is most susceptible to flooding. However, the period of warming is accompanied by a significant drop in the Oka-river water level. This allowed us to fix the recoverable succession (demutation) of cereal dominants. In recent years even in the most mesophytic phytocenoses a tendency of transition from *Phleum phleoides* dominance to *Festuca valesiaca* dominance is observed. The structure of two more xerophytic phytocenoses virtually unchanged: in the projective cover *Festuca valesiaca* and *Stipa pennata* dominate. From 2005 to 2011 the projective cover of *Stipa pennata* has increased so that now the projective cover of *Festuca valesiaca* and *Stipa pennata* doubled to 20% and 8% respectively. According to the three stationary herbal field, the average cover of the Gramineae in “Doly” ecosystem makes up 17% of the total projective cover of herbage (by Ramensky method). Thus, in the period of global warming the isolated ecosystem “Doly” (in Moscow region) became closer to the reference meadow steppes ecosystem (in Kursk region) by functional parameters, such as productivity and projective cover of the basic dominant grasses.

Keywords: ecosystem, functioning of ecosystems, climate change, meadow-steppes, Prioksko-Terrasny Biosphere Reserve.

В науках экологического профиля рождается новое научное направление – функциональная экология [1]. Задача изучения экосистем как функциональных ячеек биосферы

возникла в связи с необходимостью предвидеть и противостоять масштабным изменениям в природных комплексах под воздействием глобального потепления, антропогенного

пресса и нарастающего экологического кризиса. Необходимость функционального подхода при изучении биосферы первым осознал ещё В. И. Вернадский. Описывая геохимическую функцию живых организмов на Земле, он показал, что для познания механизмов изменений в биосфере требуется подход, «где на первый план выступает не морфологическое описание, а физиологические константы» [2]. Такой подход к исследованию экосистем основан на выделении значимого критерия в её функциональной организации [2, 3].

По нашему мнению, функционально значимым критерием для экосистем является пул органического вещества и его потоки в конкретной экосистеме. Вещество по качественному состоянию в экосистеме распределено на «живое» (ВМ – биомасса), «разлагающееся» (НМ – некромасса), «минерализованное» (ММ – минеральная масса), а магистральные потоки вещества в экосистеме (анаболизм, некроболизм и катаболизм) связаны двойственными процессами синтеза и распада органического вещества внутри каждого потока [1, 4]. С физиологической точки зрения любую экосистему можно представить как единство продуцентов (фитоценоз), консументов (зооценоз) и редуцентов (педоценоз), которые «прогоняют» вещество по метаболическому циклу, образуя относительно автономную систему, максимально пригодную в условиях конкретной климатической зоны. В процессе эволюции экосистема регулирует количество производимого органического вещества и скорость его обновления в соответствии с гидротермическими условиями географической зоны и, в конечном итоге, приводит свою структурно-функциональную организацию к динамическому равновесию с флуктуациями внешней среды в этой зоне. Таким образом, продуктивность экосистемы (способность продуцентов производить органическое вещество в результате фотосинтеза) и «рабочие» виды, производящие ежегодную продукцию, можно считать важнейшими функциональными характеристиками любой экосистемы.

В последние десятилетия одним из ключевых факторов функционирования экосистем стало глобальное потепление [5–7]. При этом наиболее выраженные признаки потепления наблюдаются на территории Европейской части России (ЕЧР), где темпы потепления почти вдвое превысили темпы глобального. Многолетний мониторинг эксклава луговой степи в Приокско-Террасном биосферном заповеднике (ПТБЗ, Московская обл.) позво-

лил зафиксировать отклик целостной экосистемы на подобные значительные изменения климатических факторов. В нашем случае изолированная экосистема луговой степи, обитающая на северо-западном пределе ареала, попав в теплый климатический тренд, сама приблизилась к условиям среды, являющимся нормой для луговых степей. Это дало возможность сравнить её основные функциональные параметры в период потепления с параметрами эталонной лугово-степной экосистемы. Цель исследования – оценить изменение продуктивности и участия основных злаков в проективном покрытии травостоя в лугово-степной экосистеме «Долы» в условиях выраженного потепления климата.

Объект и методика исследования

Изолированный северо-западный фрагмент луговых степей в ПТБЗ локализован в урочище «Долы» на нижних надпойменных террасах р. Оки. По структуре и видовому составу экосистема «Долов» на 85% близка зональным луговым степям Центрально-Черноземного заповедника (ЦЧЗ) в Курской области [8]. Доминантами в обоих случаях являются плотнодерновинные злаки. Состав бобовых и разнотравья в экосистеме «Долы» также типичен для луговых степей. Для мониторинга выбраны три стационарных участка площадью в 100 м² каждый. Постоянные участки расположены вдоль градиента влажности, а их границы определены по доминированию более или менее ксерофильных злаков – ксерофитный с доминированием *Stipa pennata*, ксеромезофитный с доминированием *Festuca valesiaca*, мезофитный с доминированием *Phleum phleoides*. Последний фитоценоз, занимая пограничное положение, находится под влиянием редких (раз в 30–40 лет), но высоких разливов р. Оки. Это может приводить к сукцессионной смене основного доминантного злака в сообществе. Период потепления, напротив, позволил зафиксировать результат демулационной сукцессии в пограничном сообществе.

Геоботанические описания и учёт надземной продукции проводились по общепринятой методике [8]. Проективное покрытие измеряли методом Браун-Бланке [9] на 100-метровых и методом Раменского [3] – на метровых площадках. Сопутствующие метеорологические наблюдения выполняет станция фонового мониторинга (СФМ) заповедника.

Результаты и их обсуждение

Тренд потепления, фиксируемый в заповеднике с 1975-го по 2011 г., совпадает с общим трендом потепления по Подмосковию и выражается в повышении среднегодовой температуры воздуха приблизительно на 2 °С. Следствием потепления стало увеличение вегетационного сезона, сдвиг сроков вегетации (начала вегетации – на неделю, окончания – на две) и аридизация местообитаний. Каждый второй-третий сезоны отмечены повторяющимися засухами – в разгар фенологической весны и в разгар фенологического лета. Период исследований (1998 по 2011 гг.) характеризуется значительным падением уровня Оки. В период весеннего разлива максимальный уровень подъема реки снизился на 2,5 м, по сравнению со среднемноголетними данными за 100 лет. Это способствует дополнительному иссушению местообитаний степняков в ранне-весенний период.

Несмотря на аридизацию пограничного биотопа, в период потепления надземная продукция экосистемы «Долы» возросла. Сравнение продуктивности экосистемы «Долы» в период потепления (1998–2011 гг.) и в контрольном периоде (1975–1985 гг.) выявило увеличение средней надземной продукции экосистемы в теплом цикле более, чем на 30% по сравнению со значениями контрольного цикла. В абсолютном выражении надземная продукция в «Долах» в период потепления достигла величины 330±5 г/м² (или 3,3 т/га/год)

против 210 г/м² (2,1 т/га/год) в контрольном цикле.

Наибольшими величинами годовой продукции отмечены умеренно влажные и теплые вегетационные сезоны. Надземная фитомасса в эти годы составила от 360±5 до 416±10 г/м² за сезон (ошибка среднего для вероятности 0,95 составляет 7%). Минимальная продукция фиксируется в жаркие сезоны, сопровождаемые продолжительной засухой. В холодном цикле таких было два (1979 и 1981 гг.), а в теплом – пять (1999, 2002, 2007, 2010, 2011 гг.). Однако даже в экстремально засушливые сезоны (2010, 2011 гг.) теплого цикла надземная итоговая продукция степных сообществ оказалась почти вдвое большей, чем в подобные сезоны холодного цикла. Если потенциальные потери надземной продукции экстремальных сезонов контрольного цикла достигали 70% от среднемноголетних значений, то в подобные сезоны теплого цикла – вдвое меньше (до 35%). Нехватка атмосферных осадков и паводковых вод в жаркие годы последнего теплого цикла компенсировалась ранней вегетацией. Быстрое нарастание эффективных температур в период, когда ещё доступна влага талых вод сказывается на быстром приросте продукции (рис. 1). Количество надземной продукции, сравнимой со среднемноголетней (220–270 г/м²), достигается уже к концу мая – началу июня. Следовательно, влага от снеготаяния, поступающая в начале вегетации, может компенсировать недостаток атмосферных осадков. При этом в зависимости от количества

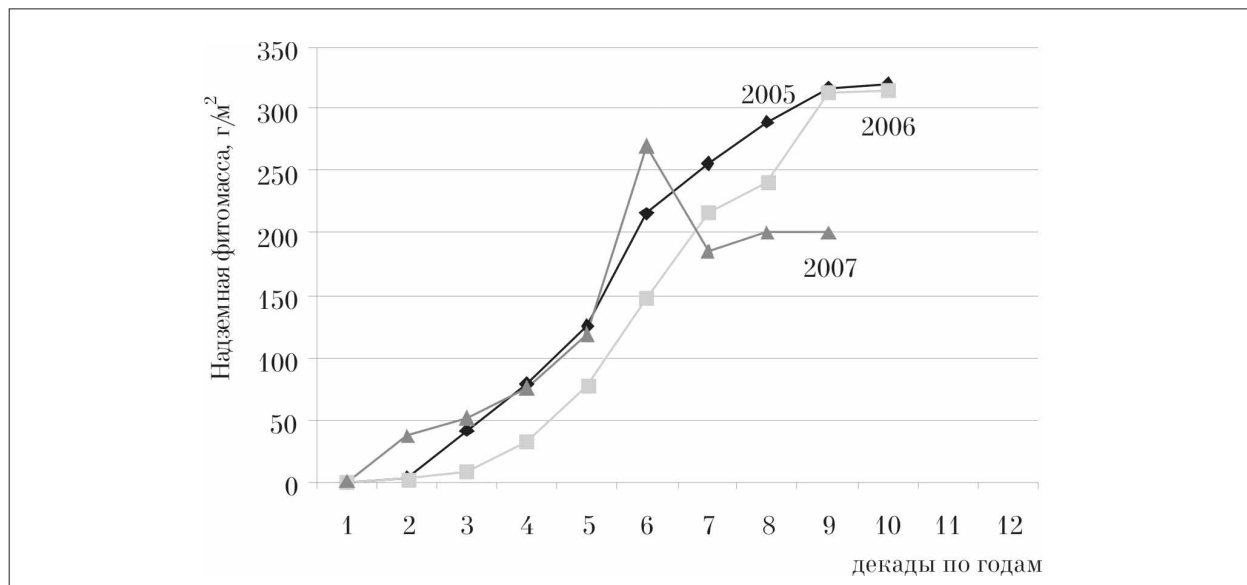


Рис. 1. Темпы прироста продукции в ксеромезофитной ассоциации «Долов» в различные вегетационные сезоны

Условные обозначения: 2005 г. – близкий к норме сезон, 2006 г. – холодный и влажный сезон, 2007 г. – жаркий и сухой сезон.

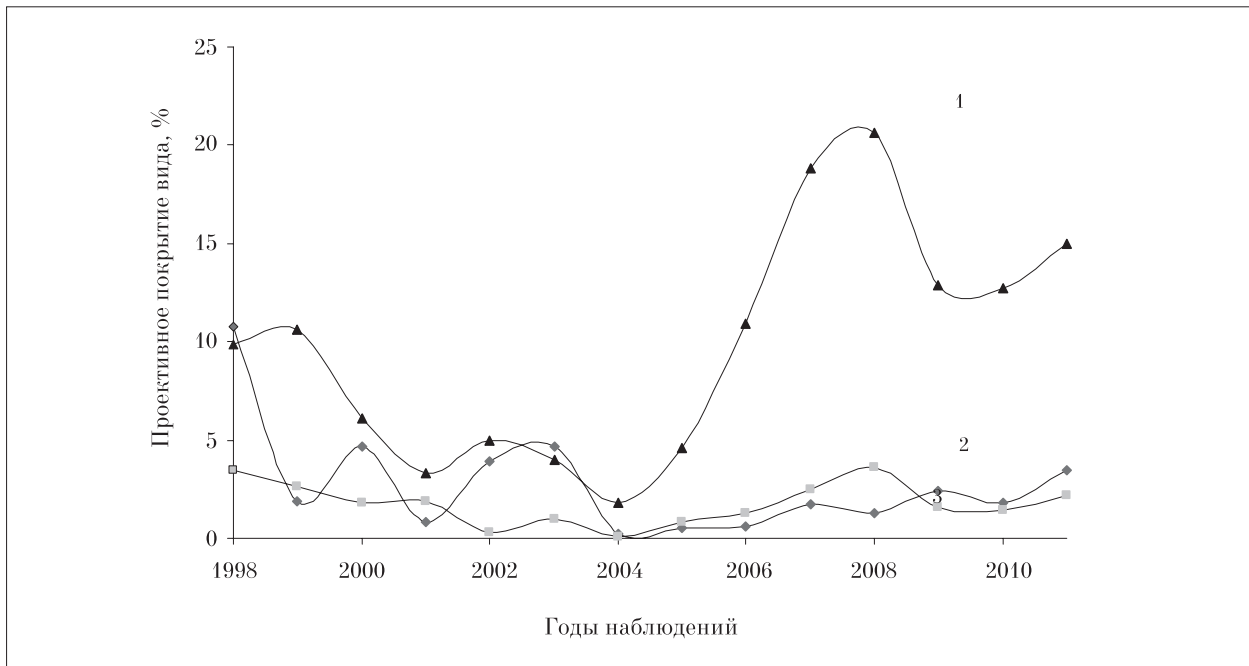


Рис. 2. Динамика проективного покрытия типчака на разных стационарах: 1 – мезофитный стационар; 2 – ксерофитный стационар; 3 – ксеромезофитный стационар
Примечание: по оси ординат – %.

весенней влаги, более благоприятные условия для старта получают то одни, то другие виды растений.

Анализ показал, что, несмотря на рост продуктивности в теплом цикле, в структуре доминантов более ксерофитных фитоценозов (с доминированием *Stipa pennata* и *Festuca valesiaca*) изменений не произошло; зато существенные изменения произошли в структуре мезофитного ценоза (с доминированием *Phleum phleoides*). В данном фитоценозе, подвергшемся паводку в 1994 г. и 1999 г., где на начало наших наблюдений доминировала тимфеевка, за последние годы из состава разнотравья выпали влаголюбивые виды (лисохвост луговой, марьянник гребенчатый), а затем произошла выраженная смена доминирующего злака. Впервые после воздействия паводка на мезофитном стационаре наблюдалась тенденция уменьшения проективного покрытия (ПП) типчака. Если в допаводковый год (1993 г.) проективное покрытие типчака в травостое этого стационара равнялось 19%, то после паводка шло постепенное уменьшение его доли: в 1998 г. ПП типчака составило 5%, в 1999 г. – 3,8%, в 2004 г. – только 2%. Во второй половине цикла исследований ПП типчака постепенно увеличивалось – с 5% в 2005 г. до 23% в 2011 г. (рис. 2).

Проективное покрытие ковыля на стационаре изменилось за этот же период ис-

следований с 1,9% до 8,7%, т. е. за период потепления в 7 лет (с 2005-го по 2011 г.) в ранее подверженном затоплению сообществе место рыхлокустовой тимфеевки занял плотнoderновинный типчак. За ксеромезофитным типчаком внедрился ксерофитный ковыль.

В итоге, за период потепления произошло сближение мезофитного и ксеромезофитного сообществ по составу доминантов за счёт ксерофитизации переходного, более мезофитного сообщества. Доминирование плотнoderновинных злаков указывает на установление типично степного состава растительности «Долов». Дерновинные злаки хорошо приспособлены переносить засушливые периоды и сохранять зачатки семян сопутствующих видов.

Часто смену доминантов в степных экосистемах связывают с уровнем залегания грунтовых вод. В ходе исследований проанализирован уровень грунтовых вод в непосредственной близости от урочища «Долы». Анализ показал, что с 2005-го по 2011 гг. произошло незначительное снижение их уровня, на 9–12 см. Но при залегании их на глубине более 7,5 м и при наличии мощного дренажа подстилающих пород в экосистеме «Долов», существенного влияния на произрастание травянистых видов грунтовые воды не оказывают.

При значительном увеличении надземной продукции в период потепления важно оценить степень участия злаков в её произ-

водстве, поскольку отнесение травянистой растительности к «остепнённым лугам» или «луговым степям» основано на соотношении доминантных злаков и сопутствующего разнотравья. Сообщества с доминированием плотнoderновинных злаков (как ковыль и типчак), относят к луговым степям. А сообщества с преобладанием мезоксерофильных злаков корневищного типа (как мятлики или вейник), даже с похожим составом разнотравья, относят к остепнённым лугам. Особенно важно наличие и доленое участие в травостое ковылей – в общем проективном покрытии луговой степи ковыли должны занимать от 5% до 50% [8].

Измеренное методом Раменского среднее проективное покрытие (ПП) злаков на всех стационарах составляет 17%; из них на долю ковыля приходится 8%, на долю типчака – 5%. Существенно, что за последние годы в ксерофитных сообществах проективное покрытие злаков практически не изменилось, а в наиболее мезофитном сообществе – значительно увеличилось. В период потепления на всех степных стационарах Долов стали доминировать плотнoderновинные ксерофильные злаки – типчак и ковыль. Даже в наиболее мезофитном сообществе в последние годы наблюдается отчётливая тенденция перехода от доминирования рыхлокустовой тимофеевки (*Phleum phleoides*) к доминированию плотнoderновинного типчака (*Festuca valesiaca*). За последние годы проективное покрытие ковыля и типчака увеличилось здесь вдвое. Доля же рыхлокустовой тимофеевки вдвое уменьшилась. Жаркие и засушливые сезоны последних лет закономерно привели к смене доминанта – в течение 5–7 лет тимофеевка сменилась типчаком, к которому интенсивно примешивается ковыль.

Заключение

Лугово-степная экосистема «Долы» (Приокско-Террасном биосферном заповеднике, Московская обл.), находясь на северо-западной границе распространения луговых степей, служит прекрасной природной моделью, демонстрирующей отклик целостной экосистемы на изменение климата и условий обитания. Период потепления 1998–2011 гг., совпавший с глобальным трендом, позволил зафиксировать изменение основных функциональных характеристик данной экосистемы – увеличение продуктивности и смену доминантных видов в пограничном сообществе.

На основе многолетнего мониторинга установлено, что потепление климата приблизило изолированную экосистему «Долы» к эталонной лугово-степной экосистеме (ЦЧЗ, Курская обл.) по продуктивности. Годовая надземная продукция лугово-степной экосистемы увеличилась более, чем на треть, и достигла 330 г/м² – в основном, за счёт сдвига вегетации на более ранние сроки.

Наблюдения на трёх стационарах, расположенных вдоль градиента влажности, показали, что структура двух более ксерофитных фитоценозов практически не изменилась – в проективном покрытии там доминируют типчак и ковыль. В более мезофитном ценозе к началу исследований доминировала *Phleum phleoides*, поскольку после воздействия паводка наблюдалась сукцессия, приведшая к уменьшению доли типчака в травостое и замене его тимофеевкой. При потеплении климата произошло сближение видового состава мезо- и ксеромезофитного сообществ, с восстановлением доли типчака в проективном покрытии травостоя за счёт ксерофитизации переходного, более мезофитного, сообщества.

В последние десятилетия на всех трёх стационарах экосистемы «Долы» проявляется ярко выраженный ксерофитный состав травостоя. Структура и продуктивность растительных сообществ соответствуют луговой степи.

Литература

1. Керженцев А.С. Функциональная экология. М.: Наука, 2006. 259 с.
2. Вернадский В.И. Биосфера и ноосфера. М.: Наука, 1989. 260 с.
3. Раменский Л.Г. Избранные работы (проблемы и методы изучения растительного покрова). Л.: Наука, 1971. 334 с.
4. Зеленская Н.Н., Керженцев А.С. Структурно-функциональное единство растительности и почвы – механизм функционирования экосистем (в связи с посадкой киотских лесов в степной зоне) // Научные ведомости Бел. ГУ. Сер. Ест. Науки, 2013. № 3 (146). Вып. 22. С. 121–126.
5. Второй оценочный доклад об изменениях климата и их последствиях на территории Российской Федерации. Т. 1. Изменения климата. М.: Росгидромет, 2014. 61 с.
6. Mori A.S., Furukawa T., Sasaki T. Response diversity determines the resilience of ecosystems to environmental change // Biological Reviews. 2013. V. 88. № 2. P. 349–364.
7. Куликов А.И., Убугунов Л.Л., Мангатаев А.Ц. О глобальном изменении климата и его экосистемных

следствиях // Аридные экосистемы. 2014. Т. 20. № 3 (60). С. 5–13.

8. Данилов В.И. О некоторых вопросах погодичной динамики степных фитоценозов // Бюл. Моск. общества испытателей природы. Отд. биол. 1981. Т. 86. Вып. 5. С. 106–120.

9. Braun-Blanquet J. Planzensociologie. 3 Aufl. Wien., N.-Y.: 1964. 865 p.

10. Лавренко Е.М. Европейские луговые степи и остепнённые дуга // Растительность европейской части СССР. Л.: Наука, 1980. С. 220–231.

References

1. Kerzhentsev A.S. The Functional Ecology. M.: Nauka. 259 p. (in Russian).

2. Vernadsky V.I. The Biosphere and Noosphere. M., Nauka, 1989. 260 p. (in Russian).

3. Ramenskiy L.G. Select of work (The Problem and methods of studying of a vegetative cover). L.: Nauka, 1971. 334 p. (in Russian).

4. Zelenska N.N. Kerzhentsev A.S. Structural and functional unity of vegetation and soil is a mechanism

of monitoring anthropogenically disturbed territories ecosystems functioning (in connection with the planting of Kyoto forests in the steppe zone // Nauchniye vedomosti BelGU. Ser. Estestv. nauki. 2013. № 3 (146). V. 22. P. 121–126 (in Russian).

5. The Second Assessment Report on climate change and their impact on the territory of the Russian Federation. In: Climate Change. T. 1. M.: Roshydromet, 2014. 61p. (in Russian).

6. Mori A.S., Furukawa T., Sasaki T. Response diversity determines the resilience of ecosystems to environmental change // Biological Reviews. 2013. T. 88. № 2. P. 349–364.

7. Kulikov A.I., Ubugunov L.L., Mangataev A.Ts. Global climate change and its impact on ecosystems // Aridnye Ecosystemy. 2014. T. 20. № 3 (60). P. 5–13 (in Russian).

8. Danilov V.I. On some issues year-dynamics of steppe phytocenoses // Bul. Moskovskogo obshchestva ispytateley prirody. Otdel. Biologii. 1981. V. 86 (5). P. 106–120 (in Russian).

9. Braun-Blanquet J. Planzensociologie. 3 Aufl. Wien., N.-Y.: 1964. 865 p.

10. Lavrenko E.M. European meadow steppes and steppe meadows // Vegetation of the European part of the USSR. L.: Nauka. 1980. P. 220–231 (in Russian).

УДК 631.4:577.4

Анализ загрязнения нефтепродуктами и хлорорганическими соединениями почв и грунтов в окрестностях российских антарктических станций

© 2017. А. В. Лупачёв¹, к. б. н., с. н. с., Н. Ф. Деева², с. н. с.,
Д. Ю. Аладин², н. с., С. М. Севостьянов², к. б. н., зав. лабораторией,
Д. В. Дёмин², к. б. н., с. н. с.,

¹ Институт физико-химических и биологических проблем почвоведения РАН,
142290, Россия, Московская обл., г. Пущино, ул. Институтская, 2,

² Институт фундаментальных проблем биологии РАН,
142290, Россия, Московская обл., г. Пущино, ул. Институтская, 2,
e-mail: a.lupachev@gmail.com

Проведены исследования содержания углеводородов нефти и её производных антропогенного происхождения (УВН) совместно с природными органическими углеводородами (ОУВ) в почвах и грунтах; хлорорганических соединений в орнитогенных отложениях, животных тканях и органогенных горизонтах почв в окрестностях российских полярных исследовательских станций в Антарктике. Почвы и грунты под линейными объектами и вблизи нефтебаз накапливают углеводороды нефти и её производные – в среднем от 150 до 600, а в локальных случаях 2200 мг/кг и более. В представленных образцах обнаружен ряд стойких органических загрязнителей (СОЗ) – пестицидов и их метаболитов. Во всех пробах присутствует гексахлорбензол (ГХБ). Присутствие повышенных доз дихлордифенилтрихлорэтана (ДДТ) и чрезвычайно высокое содержание его метаболитов в животных тканях свидетельствует о том, что не происходит снижения содержания этого химиката в экосистемах Антарктики. Накопление СОЗ связано как с трансграничной передачей в виде аэрозолей, так и с поступлением с океаническими водами.

Ключевые слова: Антарктика, антропогенное загрязнение, нефтепродукты, дизельное топливо, стойкие органические загрязнители, ДДТ.

Analysis of pollution with oil products and organochlorines of soils in the vicinity of Russian Antarctic stations

A. V. Lupachev¹, N. Ph. Deeva², D. Y. Aladin², S. M. Sevostyanov², D. V. Demin²,

¹ Institute of Physicochemical and Biological Problems of Soil Science RAS,
2 Institutskaya St., Pushchino, Moscow Region, Russia, 142290,

² Institute of Basic Biological Problems RAS, 1,
2 Institutskaya St., Pushchino, Moscow Region, Russia, 142290,
e-mail: a.lupachev@gmail.com

The investigations were conducted on the content of petroleum hydrocarbons and its derivatives of anthropogenic origin together with natural organic hydrocarbons in soils; organochlorine compounds in ornithogenic sediments, in animal tissues and in organogenic horizons of soils in the vicinity of Russian polar research stations in the Antarctic. Soils and grounds under the linear facilities and near oil depots accumulate petroleum hydrocarbons and its derivatives, their amount is from 150 to 600 mg/kg on the average, in local cases up to 2200 mg/kg or more. It was re-established that the major share in the composition of petroleum hydrocarbons in anthropogenically contaminated soils and grounds comprises heavy and slightly toxic fractions; the most toxic volatile fractions are not accumulated as a result of harsh weather conditions (primarily, wind and insolation regimes), as well as of a high degree of skeletal fraction of substrates. A number of persistent organic pollutants (POPs), such as pesticides, herbicides, and their metabolites are found in the submitted sample. All samples contain hexachlorobenzene (HCB). The presence of high doses of dichlor-diphenyltrichlor-ethane (DDT) and its extremely high content of metabolites in animal tissues indicates that there is no decrease in the level of this chemical in Antarctic ecosystems. The accumulation of POPs is due to both cross-border transfer in the form of aerosols (detected by moss-lichen associations), and to the influx of ocean water, to further movement through food chains in the ecosystem and access with waste products (guano and birds and animal tissues).

Keywords: Antarctica, anthropogenic pollution, petroleum, diesel fuel, persistent organic pollutants (POPs), DDT.

Антропогенные объекты и сооружения в Антарктике занимают от 10–15% (станции Прогресс-2, Новолазаревская) до 80% (Мирный) свободной ото льда территории оазисов, а зона активного влияния человека часто перекрывает всю их площадь. На территории одного оазиса могут одновременно базироваться от 2–4 до 7 научных станций различных государств. Практически во всех освоенных оазисах выявлено загрязнение компонентов экосистем нефтепродуктами, стойкими органическими соединениями [1–3].

Исследование в почвах и грунтах содержания персистентных органических веществ (ПОВ), стойких органических токсичных загрязняющих веществ и смесей, существующих длительное время в биосфере и оказывающих сильное негативное воздействие на живые организмы, стало одним из первых в российской практике.

Объекты и методы исследования

Почвы антарктических оазисов изучались на ключевых участках в ходе 55–57 Российских антарктических экспедиций (2009–2012 гг.) – станции Новолазаревская, Молодёжная, Союз, Дружная-4, Прогресс,

Мирный, Оазис (Бангера), Ленинградская, Русская и Беллинсгаузен (рис.). За указанный период сделано 66 почвенно-геоботанических и ландшафтных описаний, отобрано около 140 образцов фоновых и антропогенно нарушенных почв и грунтов, различными методами проанализировано более 120 образцов.

Для характеристики физико-химических свойств почв и грунтов применялись общепринятые методы [4].

Образцы для определения содержания углеводов нефти отбирались двумя способами: воздушно-сухая масса – в хлопчатобумажные воздухопроницаемые мешки для почвенных проб, замороженная масса – в воздушнонепроницаемые стерильные пакеты. Таким образом удалось определить долю летучих соединений, теряющихся при транспортировании образцов в воздушно-сухом состоянии. Валовое содержание нефтяных углеводов в фоновых и антропогенно нарушенных почвах определялось при помощи инфракрасного спектрометра АН-2 [5].

Образцы почв, растительных и животных остатков были проанализированы на содержание стойких органических загрязнителей в химико-аналитическом центре НПО «Тайфун».

Результаты и их обсуждение

Для всего ряда почв характерна малая мощность почвенного профиля (от 5 до 25 см). Сухие почвы каменных мостовых, лишённых растительности, преимущественно слабощелочные, содержание органического углерода ($C_{орг.}$) составило 0,2–1% (табл. 1). Почвы под лишайниками слабокислые и кислые, $C_{орг.}$ достигает 8–10% в верхних горизонтах и около 1–5% в средних частях профилей. Почвы влажных местообитаний под водорослево-бактериальными матами находятся в диапазоне от нейтральных до кислых, $C_{орг.}$ – 0,5–2%. Почвы под мхами слабокислые, $C_{орг.}$ – 1–3% (максимум 8–10% в верхних горизонтах). Почвы под линьками пингвинов как современными, так и брошенными, сильнокислые, $C_{орг.}$ равно 4–6% (максимум около 20% в верхних горизонтах). Доля мелкозёма (< 1 мм) в этом ряду почв колеблется от 10–15% до 30–40% (табл. 1). Отношение физического песка к физической глине (ФП/ФГ) преимущественно варьирует в пределах от 88–95% до 5–12%.

Почвы, подверженные антропогенному воздействию, содержат 40–50, а порой и до 70% мелкозёма. Несмотря на слабое оструктурирование и агрегирование материала, загрязняющие вещества способны аккумулироваться на поверхностях отдельных частиц и зёрен, где широко распространены плёнки вторичных минералов (показатель гигроскопической влажности достигает 3–7%, в отличие от 0,5–1% в ненарушенных почвах). Нарушенные почвы имеют более низкие значения pH по сравнению с фоновыми (табл. 1).

Анализ содержания углеводородных групп. Проведены исследования содержания



Рис. Карта-схема расположения ключевых участков исследований в Антарктиде

углеводородов нефти и её производных антропогенного происхождения (УВН) совместно с природными органическими углеводородами (ОУВ) в почвах и грунтах оазисов Антарктиды (УВН+ОУВ). Выявлено, что местообитания, не затронутые антропогенной деятельностью, могут содержать от 40–60 до 120–140 (в реголитах – продукт выветривания массивных горных пород без растительного покрова), до 250–300 мг/кг (в почвах с развитым органо-генным профилем) [3]. На данном этапе исследований трудно определить абсолютную долю УВН в суммарном показателе. Но по косвенным признакам (отношению содержания $C_{орг.}$ к валовому содержанию УВН+ОУВ) можно предположить, что значимым показателем загрязнения для антарктических почв является валовое содержание УВН+ОУВ более 100–150 мг/кг для реголитов, и более 250–

Таблица 1
Содержание органического углерода, углеводородов нефти антропогенного происхождения и природных органических углеводородов

Образец	Станция	Индекс образца	УВН+ОУВ мг/кг	$C_{орг.}$	pH водн.
Фоновые почвы	Новолазаревская	N1-01	192,4	0,41	6,86
		N1-03	120,2	2,75	6,74
		N1-04	356,7	1,13	6,62
		N1-06	227,7	0,98	7,09
	Беллинсгаузен	В1-03	333,3	4,10	5,76
Антропогенно нарушенные почвы	Новолазаревская	N1-09 1	415,8	0,24	7,17
		N1-09 2	573,7	0,24	6,88
		N1-09 3	1402,4	2,04	6,49
	Беллинсгаузен	В1-04 1	678,5	0,56	7,58
		В1-04 2	1834,8	0,72	6,97
Русская	Rs-04	2205,9	1,77	4,98	

Таблица 2

Содержание стойких органических загрязнителей в почвах, орнитогенных отложениях и животных тканях

Определяемое соединение, мкг/кг сухого веса	Материал образца				
	животные ткани	орнитогенные отложения			органогенный горизонт
	№ 1, ст. Новолазаревская	№ 2, ст. Дружная-4	№ 3, ст. Прогресс-2	№ 4, ст. Мирный	№ 6, ст. Русская
Гексахлорбензол	166,42	1,25	1,07	0,30	1,54
Гексахлоран	6,62	<0,05*	<0,05	<0,05	<0,05
Гептахлор эпоксид	0,919	<0,10	<0,10	<0,10	<0,10
Оксихлордан	30,87	<0,08	0,73	<0,08	<0,08
Транс-хлордан	2,66	<0,03	<0,03	<0,03	<0,03
Транс-нонахлор	12,87	<0,01	0,14	<0,01	<0,01
2,4'-ДДЕ	1,64	<0,03	<0,03	<0,03	<0,03
4,4'-ДДЕ	265,60	<0,03	2,16	<0,03	0,13
4,4'-ДДД	5,66	<0,03	<0,03	<0,03	<0,03
2,4'-ДДТ	1,16	<0,08	<0,08	<0,08	<0,08
4,4'-ДДТ	13,40	<0,08	<0,08	<0,08	<0,08
Дильдрин	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	1,87
Мирекс	33,48	<0,03	<0,03	<0,03	<0,03

Примечание: * – ниже уровня определения.

300 мг/кг – для почв с развитым наземным растительным покровом или поверхностными орнитогенными отложениями (табл. 1).

Почвы и грунты под линейными объектами и вблизи нефтебаз накапливают также нефтепродукты – от 150 до 600, а в локальных случаях 2200 мг/кг и более, что соответствует среднему и высокому уровням загрязнения.

Для определения доли летучих соединений в антропогенно загрязнённых почвах и грунтах проведено сравнение содержания УВН+ОУВ в образцах, отличающихся по характеру пробоподготовки. Данные по валовому содержанию УВН+ОУВ показывают, что различие между двумя данными группами образцов составляет порядка 10%, причём воздушно-сухие образцы иногда содержали больше УВН+ОУВ, чем их мёрзлые, изолированные от окружающей среды аналоги. Таким образом, можно сделать предварительный вывод о том, что основную долю в составе УВН в антропогенно загрязнённых почвах и грунтах антарктических оазисов составляют тяжёлые и слаботоксичные фракции, а наиболее токсичные высоколетучие фракции УВН не накапливаются вследствие жёстких климатических условий, а также высокой степени скелетности данных субстратов.

Анализ содержания хлорорганических соединений. В представленных образцах обнаружен ряд СОЗ – пестицидов и их метаболитов

(табл. 2). Во всех пробах присутствует гексахлорбензол (ГХБ). Присутствие повышенных доз ДДТ и чрезвычайно высокое содержание его метаболитов, в частности 4,4'-ДДЕ (дихлородифенилдихлороэтилен) в животных тканях, обнаруженных на поверхности органогенных горизонтов почв, свидетельствует о том, что не происходит снижения уровня этого химиката в экосистемах Антарктики [6]. Присутствие инсектицида «Мирекс» в тканях животных и отсутствие его в других образцах может быть связано с поступлением его в организм птиц по трофическим цепям.

Мхи и лишайники, имеющие развитую поверхность, обычно относят к индикаторам атмосферного загрязнения [7]. Отсутствие у этих растений корневой системы и преобладание аэриального поступления вещества позволяет считать их аккумуляторами атмосферных аэрозолей, содержащих загрязняющие вещества.

Выводы

1. Определено фоновое содержание природных органических углеводов в ненарушенных почвах оазисов Антарктиды. Почвы и грунты под линейными объектами и вблизи нефтебаз, наравне с природными органическими углеводородами, накапливают углеводороды нефти и её производные – в среднем от

150 до 600, а в локальных случаях 2200 мг/кг и более, что соответствует среднему и высокому уровням загрязнения.

2. С учётом этих показателей определено, что значимыми для антарктических почв показателями загрязнения является валовое содержание углеводов нефти и органических углеводов: более 100–150 мг/кг для реголитов, лишённых растительного покрова, и более 250–300 мг/кг – для почв с развитым наземным растительным покровом или поверхностными орнитогенными отложениями.

3. Предварительно установлено, что основную долю в составе углеводов нефти в антропогенно загрязнённых почвах и грунтах составляют тяжёлые и слаботорксичные фракции, а наиболее токсичные высоколетучие фракции не накапливаются вследствие жёстких климатических условий (ветровой режим и инсоляция), а также высокой степени скелетности данных субстратов.

4. Проведено определение стойких органических загрязнителей в образцах животных тканей, орнитогенных отложений и органо-генных горизонтов почв. Накопление поллютантов, выявленное в напочвенных покровах, связано как с трансграничным переносом этих веществ в виде аэрозолей (мохово-лишайниковые ассоциации), их дальнейшим растворением и переносом с поверхностными и грунтовыми водами (бактериально-водорослевые маты), так и с поступлением с океаническими водами, дальнейшим перемещением по пищевым цепям и выходом в экосистему с продуктами жизнедеятельности (гуано и животные ткани птиц).

Работы выполнены при частичной поддержке грантов РФФИ (15-29-02629офи-м; 16-04-01050а, 15-04-06118а).

Литература

1. Абакумов Е.В., Ладыгин Е.Д., Габов Д.А., Крыленков В.А. Содержание полициклических ароматических углеводов в почвах Антарктиды на примере Российских полярных станций // Гигиена и санитария. 2014. № 1. С. 31–35.

2. Какарека С.В., Кухарчик Т.И. Загрязнение природной среды в районах базирования антарктических научных станций // Природопользование. Сб. научных

трудов Института природопользования НАН Беларуси. 2015. Вып. 27. С. 222–229.

3. Aislabie J, Balks M, Astori N, Stevenson G, Symons R. Polycyclic aromatic hydrocarbons in fuel-oil contaminated soils, Antarctica // Chemosphere. 1999. V. 39 (13). P. 2201–2207.

4. Фомин Г.С., Фомин А.Г. Почва. Контроль качества и экологической безопасности по международным стандартам. Справочник. М.: Протектор, 2001. 300 с.

5. Смит А. Прикладная ИК-спектроскопия: основы, техника, аналитическое применение / Под ред. А.А. Мальцева. М.: Мир, 1982. 328 с.

6. Аладин Д.Ю., Дёмин Д.В., Деева Н.Ф., Лупачёв А.В., Ильина А.А., Севостьянов С.М. Анализ загрязнения хлорорганическими соединениями компонентов экосистемы Антарктиды // Известия Уфимского научного центра РАН. 2013. № 3. С. 110–113.

7. Thomas W., Simon H., Ruhling A. Classification of plant species by their organic (PAH, PCB, HBC) and inorganic (heavy metals) trace pollutant concentrations // Science of the Total Environment. 1985. V. 46. P. 83–94.

References

1. Abakumov E.V., Lodygin E.D., Gabov D.A., Krylenkov V.A. Polycyclic aromatic hydrocarbons content in Antarctica soils as exemplified by the Russian polar stations // Gigena i Sanitariya. 2014. № 1. P. 31–35 (in Russian).

2. Kakareka S.V., Kukharchyk T.I. Environmental contamination of Antarctic scientific stations Location sites // Prirodopolzovanie. Sb. nauchnikh trudov Instituta Prirodopolzovaniya NAN Belarusi. 2015. V. 27. P. 222–229 (in Russian).

3. Polycyclic aromatic hydrocarbons in fuel-oil contaminated soils, Antarctica // Chemosphere. 1999. V. 39 (13). P. 2201–2207.

4. Fomin G.S., Fomin A.G. The soil. Quality control and environmental safety by international standards. Manual. M.: Protector, 2001 300 p.

5. Smith A. Applied Infrared Spectroscopy: fundamentals, techniques, analytical application / Ed. A.A. Maltsev. M.: Mir, 1982. 328 p. (in Russian).

6. Aladin D.Yu., Demin D.V., Deeva N.F., Lupachov A.V., Ilina A.A., Sevostyanov S.M. Analysis of Organochlorine contamination in Antarctic ecosystem components // Izvestiya Ufimskogo nauchnogo tsentra RAN. 2013. № 3. P. 110–113 (in Russian).

7. Thomas W., Simon H., Ruhling A. Classification of plant species by their organic (PAH, PCB, HBC) and inorganic (heavy metals) trace pollutant concentrations // Science of the Total Environment. 1985. V. 46. P. 83–94.

**Мониторинг тяжёлых металлов в экосистеме
малой реки Окского бассейна**

© 2017. Ю. А. Мажайский¹, д. с.-х. н., профессор, гл. н. с.,
Т. М. Гусева², к. с.-х. н., доцент,

¹Всероссийский научно-исследовательский институт гидротехники
и мелиорации им. А. Н. Костякова, Мещерский филиал,
390021, Россия, Рязань, пос. Солотча, ул. Мещерская, 1 а,

²Рязанский государственный медицинский университет
им. академика И. П. Павлова,
390026, Россия, г. Рязань, ул. Высоковольтная, 9,
e-mail: mail@mntc.pro, guseva.tm@yandex.ru

Одними из приоритетных загрязняющих веществ гидросферы являются тяжёлые металлы (ТМ). С целью выявления степени загрязнения ТМ поверхностных вод малых рек Окского бассейна проводится многолетний мониторинг на экологическом полигоне – крупномасштабной природной модели, созданной для проведения комплексных исследований, оценки степени воздействия антропогенных нагрузок на состояние экосистем и получения информации, необходимой для решения проблем рационального природопользования как на локальном, так и региональном уровнях. Программа мониторинга включает оценку экологического состояния поверхностных и грунтовых вод, гидробиологические и микробиологические исследования.

Анализ информации, полученной в ходе мониторинга, позволил установить, что максимум содержания ТМ в воде отмечается в зимний период, минимум – в летний. В содержании ТМ в грунтовых водах также, как и в воде водоёма, наблюдается определенная зависимость. Отмечали увеличение концентрации ТМ в грунтовой воде с апреля по июль. Затем концентрация ТМ в грунтовых водах постепенно снижается и достигает минимума в августе. С августа наблюдается постепенное увеличение концентраций ТМ во всех скважинах и достигает своего максимального значения в декабре, затем – постепенное снижение до марта.

В рамках мониторинга, проводимого на территории экологического полигона, был разработан и проведён микробиологический эксперимент, позволяющий оценить влияние различных концентраций ТМ в воде на микроорганизмы. Во всех вариантах опыта наблюдалось уменьшение количества колоний бактерий при увеличении концентрации тяжёлых металлов в воде, что свидетельствует о гибели видов микробов, наиболее чувствительных к токсикантам. Такая ситуация может негативно отразиться на самоочищающей способности водоёма. Проведённые комплексные исследования важнейшего компонента ландшафта Окского бассейна – малой реки свидетельствуют о значительной антропогенной нагрузке на её экосистему, обусловленной сельскохозяйственной деятельностью, на что указывают повышенное содержание ТМ в поверхностных и грунтовых водах и гидробиологические показатели. Таким образом, на ландшафтах Окского бассейна, где находится значительное количество подобных водоёмов, складывается потенциально опасная экологическая ситуация.

Ключевые слова: тяжёлые металлы, малая река, экосистема, экологический полигон, гидробионты, микроорганизмы.

**Monitoring of heavy metals in the ecosystem
of a small river of the Oka Basin**

U. A. Mazhaysky¹, T. M. Guseva²,

¹Russian Scientific-Research Institute of Hydrotechnics
and Melioration n.a. A.N. Kostyakov, Meschersky branch,
1 a Mescherskay St., Solotcha community, Ryazan, Russia, 390021,

²Ryazan State Medical University n.a. academician I. P. Pavlov,
9 Vysokovolttnaya St., Ryazan, Russia, 390026,
e-mail: mail@mntc.pro, guseva.tm@yandex.ru

Heavy metals (HM) belong to the main pollutants of the hydrosphere. We aim at defining the degree of pollution of small rivers surface water in the Oka river basin with HM. We have made a long-term monitoring on the ecological range, which is a large-scale natural model created for complex researches, for assessing the degree of anthropogenic influence on ecosystems' state and getting information necessary for rational nature management both on local and regional levels. The

monitoring program included estimation of ecological state of surface and ground water, hydrobiological and microbiological researches. The analysis of the information received during the monitoring enabled to establish that the maximum level of HM concentration in water is observed in winter period, and the minimum one – in summer period. There is a certain dependency in HM concentration both in ground waters and basin water. Increase of HM concentration in ground water is observed from April till July. Then HM concentration gradually diminishes and reaches its minimum in August. Then from August gradual increase of HM concentration is registered in all wells and it reaches its maximum in December, which is followed by gradual decrease till March. As a part of the monitoring held on the territory of ecological range, a microbiological experiment was made that enables to define influence of different degrees of HM concentration on microorganisms.

All the variants of the experiment are marked by decrease of bacteria colonies with increase of HM concentration in water, that indicates demise of microbes that are the most sensitive to toxicants. Such a situation may affect self-cleaning ability of the basin. The complex research of the most important component of the landscape of the Oka river basin, of the small river, show a huge anthropogenic influence on its ecosystem caused by agricultural activity that is indicated by excessive concentration of HM in surface and ground water and hydrobiological indicators. Thus there is an ecologically dangerous situation on the territory of the Oka river basin with a big amount of such water bodies.

Keywords: heavy metals, small river, ecosystem, environmental, landfill, hydrobionts, microorganisms.

Многолетний мониторинг состояния крупных рек России свидетельствует о сохраняющейся тенденции ухудшения качества воды в результате длительного антропогенного воздействия. Одними из приоритетных загрязняющих веществ гидросферы являются тяжёлые металлы (ТМ) [1].

Река Ока – наиболее крупный приток р. Волги и главный водоток Рязанской области. Бассейн р. Оки включает 895 малых и средних рек, общей протяжённостью 105255 км [2]. Существующая сеть наблюдений за гидрохимическими характеристиками Окских вод не в состоянии оценить реальную экологическую ситуацию, складывающуюся в бассейне р. Оки, так как не охвачены мониторингом малые реки, которые во многом определяют качество воды.

Основная часть малых и средних рек региона протекает в районах сельскохозяйственного использования земель, являясь компонентом преобразованных ландшафтов и испытывающих значительную антропогенную нагрузку, так как именно эти водные объекты принимают стоки с сельскохозяйственных земель, которые приносят в водные объекты значительное количество как биогенных веществ, так и ТМ. С целью выявления степени загрязнения ТМ поверхностных вод малых рек Окского бассейна проводится многолетний мониторинг на экологическом полигоне – крупномасштабной природной модели, созданной для проведения комплексных исследований, оценки степени воздействия антропогенных нагрузок на состояние экосистем и получения информации, необходимой для решения проблем рационального природопользования как на локальном, так и региональном уровнях [3]. Экологический полигон имеет площадь 3000 га и представляет собой ландшафт лесостепной зоны, типичный для Мещерской низменности. Структурно он представлен следующими элементами: пашня,

пастбище, орошаемые и осушаемые земли, дачные участки, лес, акватория. На территории исследуемого ландшафта находится малая река, непосредственно связанная с водной системой р. Оки, которая является объектом исследований.

Программа мониторинга включает оценку экологического состояния поверхностных и грунтовых вод, гидробиологические исследования. Отбор проб воды проводится по стандартным методикам. Определение валового содержания ТМ в воде и растительности проводится методом атомно-абсорбционной спектрометрии. В рамках мониторинга был осуществлён также гидробиологический и микробиологический анализ поверхностных вод модельного ландшафта [4].

Исследуемый водоём испытывает антропогенную нагрузку в результате функционирования на опытном ландшафте системы орошения, дренажа, земель частного использования. Водный объект является коллектором, принимающим с ландшафта поверхностный и внутрпочвенный стоки. На протяжении ряда лет в рамках проводимого мониторинга содержания ТМ в воде опытного водоёма ежемесячно отбирались пробы воды. Расположение точек пробоотбора позволяет оценить качество воды на всём протяжении водного объекта. Результаты мониторинга показали, что концентрация Pb находится в пределах ПДК для рыбохозяйственных водоёмов, содержание Cd, Cu и Zn в ряде случаев превышает этот показатель. Содержание Cu и Zn находится в пределах ПДК для водоёмов санитарно-бытового назначения, однако наблюдается превышение данного норматива по Cd и Pb. Концентрация Pb, в основном в осенне-зимний период, больше ПДК для оросительной воды.

Сложившаяся ситуация на водоёме, принимающем только стоки с земель сельскохозяйственного использования, представляет потенциальную экологическую опасность для Окского бассейна, о чём свидетельствует повы-

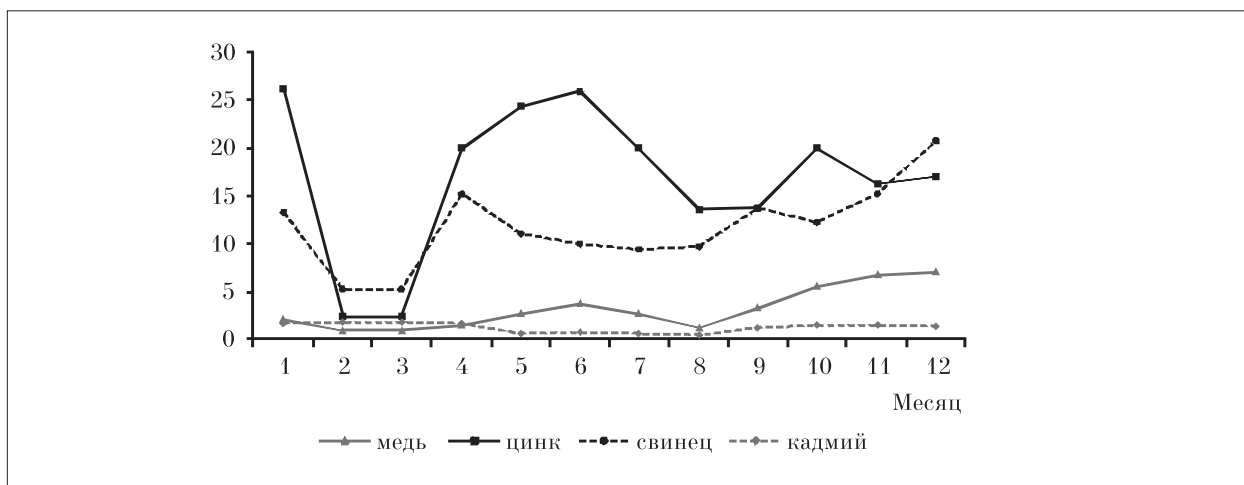


Рис. 1. Годовая динамика содержания тяжелых металлов в воде, мкг/л

шенное содержание ТМ в воде на замыкающем створе, это указывает на неспособность водоёма к процессам самоочищения.

Анализ информации, полученной в ходе мониторинга, позволил установить, что максимум содержания Cd в воде отмечается в зимний период, минимум – в летний. Наименьшее содержание Zn приходится на февраль-март, максимальная концентрация – на январь, май-июнь, ноябрь. В динамике содержания Cu и Pb отмечалась следующая зависимость: наименьшие их концентрации определены в феврале-марте, отмечали рост содержания до мая, затем – постепенное снижение концентрации в летний период и увеличение содержания элементов в осенне-зимний период с максимумом в декабре. Внутригодовая динамика содержания ТМ в воде малой реки представлена на графиках (рис. 1).

Сезонное изменение концентрации ТМ в воде можно объяснить влиянием атмосферных осадков, постепенной седиментацией водных

взвесей, адсорбирующих ТМ, а также аккумуляцией ТМ водной биотой, которая, отмирая осекая, обогащает воду поллютантами.

На территории экополигона пробурены скважины для определения уровня и качества грунтовых вод. Отбор проб воды проводили из четырёх скважин: 7, 8, 13, 14 – наиболее приближенных к малой реке и перехватывающих подземный приток с территории ландшафта. Данные многолетнего мониторинга показывают, что в содержании ТМ в грунтовых водах, так же как и в воде водоёма, наблюдается определенная зависимость. Для Cu, Pb, Cd отмечали увеличение концентрации в грунтовой воде с апреля по июль, для Zn – с марта по апрель. Затем концентрация ТМ в грунтовых водах постепенно снижается и достигает минимума в августе. С августа наблюдается постепенное увеличение концентраций ТМ во всех скважинах и достигает своего максимального значения в декабре, затем – постепенное снижение до

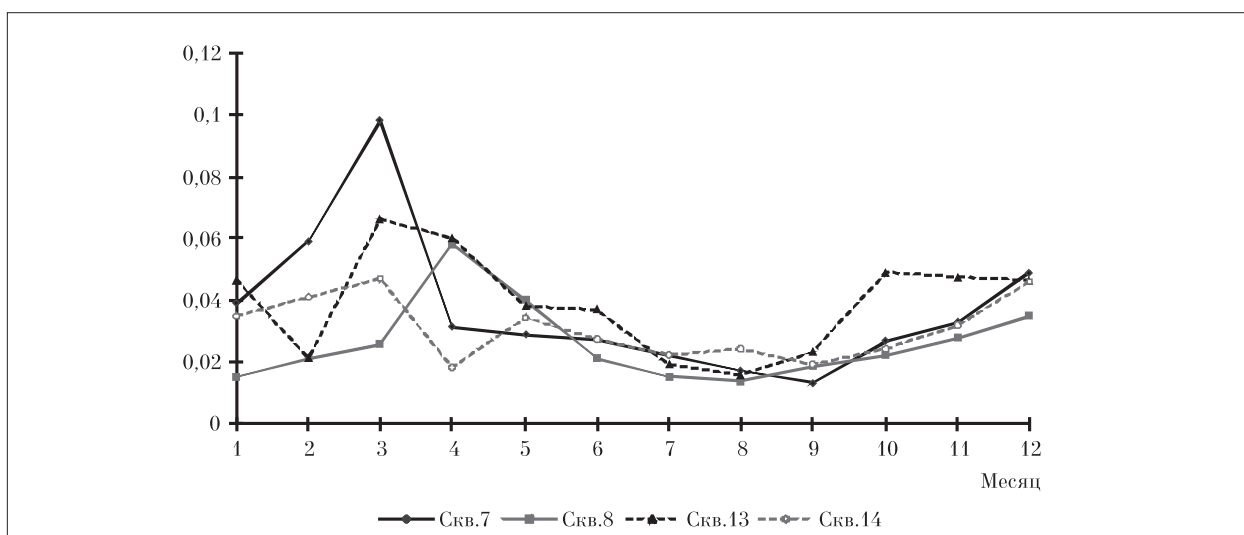


Рис. 2. Динамика содержания цинка в грунтовых водах, мг/л

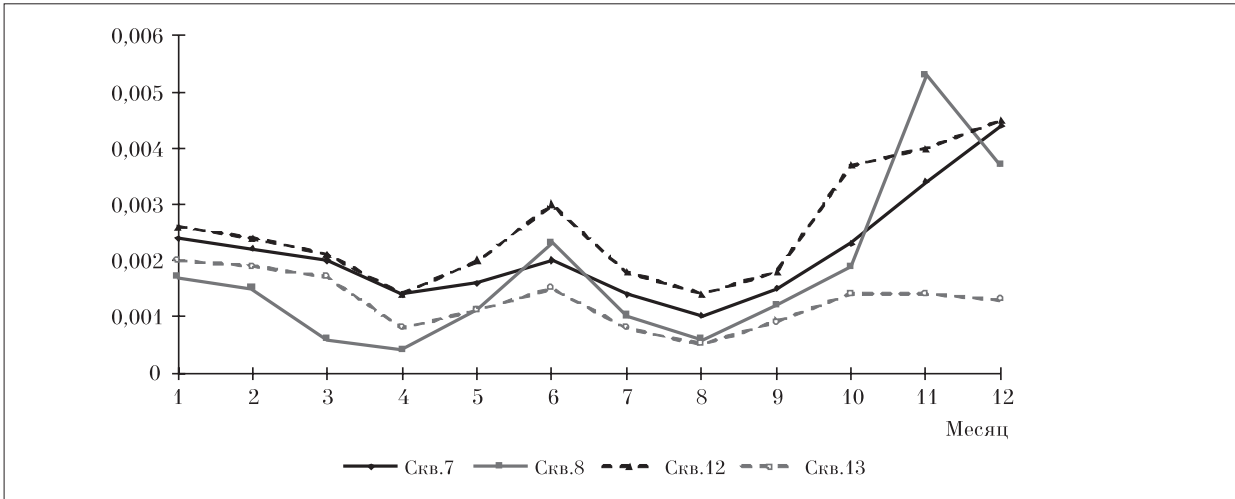


Рис. 3. Динамика содержания кадмия в грунтовых водах, мг/л

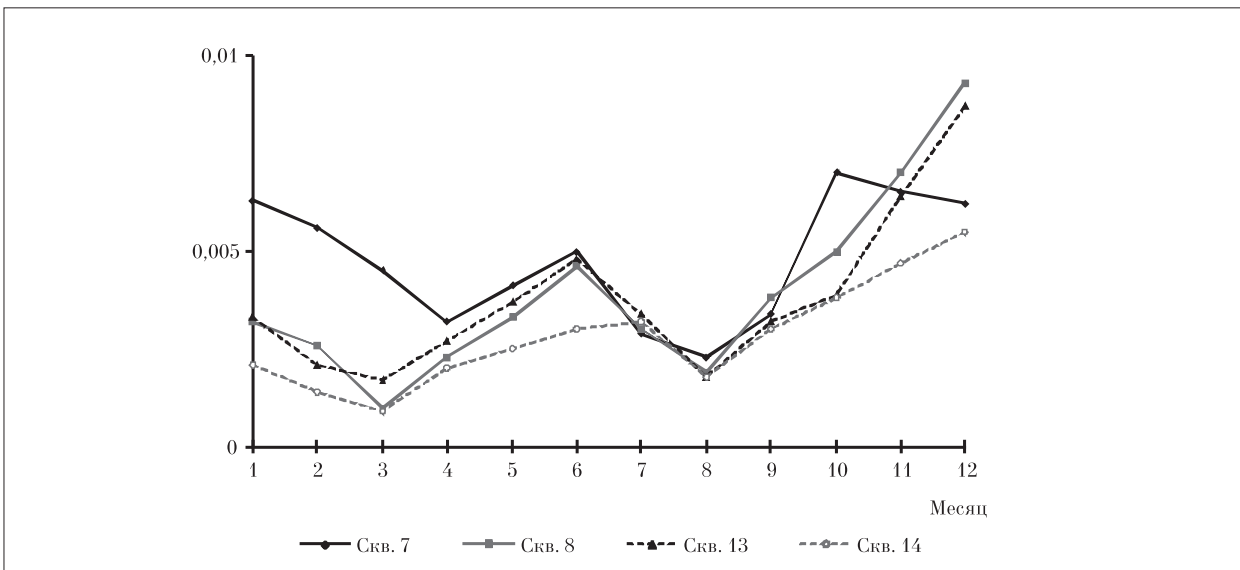


Рис. 4. Динамика содержания меди в грунтовых водах, мг/л

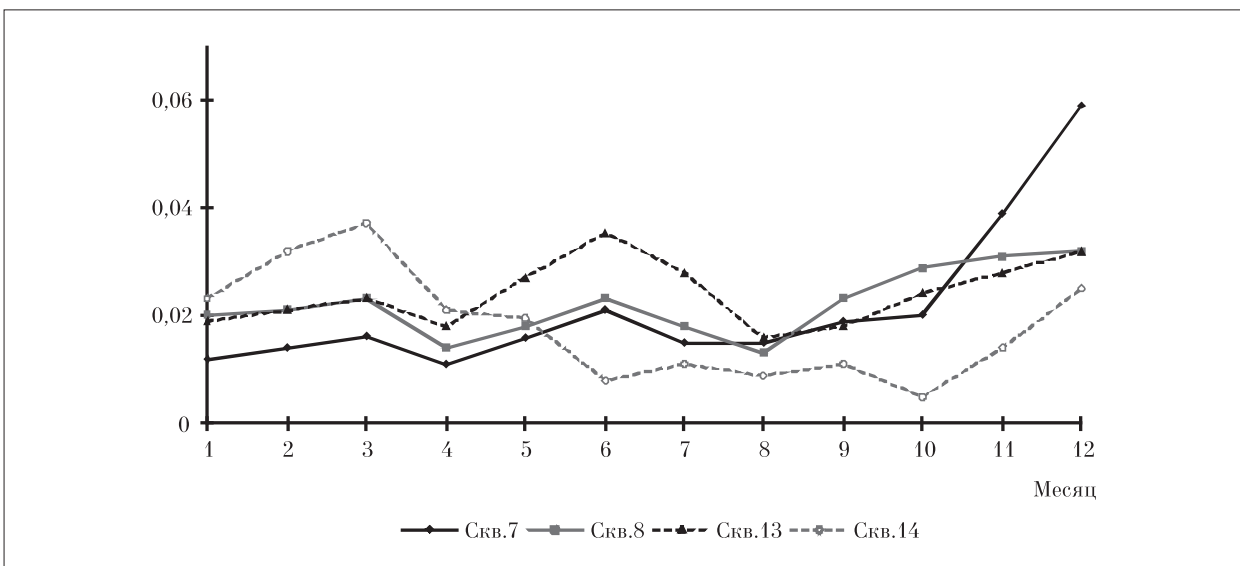


Рис. 5. Динамика содержания свинца в грунтовых водах, мг/л

Таблица

Влияние тяжёлых металлов на численность микроорганизмов, КОЕ/мл

Вариант опыта	Численность микроорганизмов
Контроль	307,0±1,8
3 ПДК	29,0±0,7
6 ПДК	22,0±1,5
9 ПДК	16,0±1,5

марта-апреля. Такое распределение концентраций ТМ в грунтовых водах зависит как от природных, так и от антропогенных факторов. Повышение концентрации ТМ в весенний период можно объяснить таянием снежного покрова, в котором происходит значительное их накопление. В летний период источником ТМ в грунтовых водах могут явиться также и дождевые осадки, однако содержание поступления ТМ в этот период наименьшее, что объясняется активной вегетацией растений. В осенне-зимний период идёт постепенное нарастание концентрации ТМ в грунтовых водах, именно в это время в почве происходит разложение растительных остатков, которые содержат определённое количество ТМ. Результаты мониторинга показали, что наименьшее содержание ТМ характерно для грунтовых вод, поступающих от лесного массива (скважина 14), наибольшее – для грунтовых вод, формирующихся в районе дачных участков, пашни, пастбища, орошаемых земель (скважины 7, 8, 13). Причём для грунтовых вод, поступающих с дачных участков, характерно доминирование **Zn и Pb, что является доказательством наибольшей антропогенной нагрузки именно на этот элемент ландшафта (рис. 2–5).**

Одним из информативных показателей антропогенной нагрузки на водные экосистемы является видовой состав гидробионтов, претерпевающий существенные изменения под влиянием ксенобиотиков [5]. С целью определения видового разнообразия водной биоты исследуемого водоёма был проведён гидробиологический анализ. Исследование показало, что в изучаемом водоёме преобладают диатомовые водоросли (*Synedra*, *Navicula*, *Melosira*) и цианобактерии (*Anabena*), доминируют простейшие жгутиковые (*Euglena*, *Bodo*, *Monas*) и инфузории (*Paramecium*, *Lionotus*, *Oxytricha*, *Vorticella* (*conica*), *Didinium*), многоклеточные беспозвоночные представлены веслоногими раками (*Cyclops*) и личинками хирономид (*Chironomus plumosus*), основная высшая водная растительность: элодея канадская (*Elodea canadensis*), ряска (*Lemna*), тростник обыкновенный (*Phragmites australis*), ихтиофауна отсутствует. Согласно перечню организмов – индикаторов сапробности, большая часть обнаруженных в водном объекте

гидробионтов принадлежит к β-мезосапробам, но в то же время отмечается присутствие полисапробов (жгутиковые, личинки хирономид), что указывает на существующее загрязнение воды. Обеднение видового состава гидробионтов исследуемого водоёма является адекватным показателем его загрязнения.

В воде природных водоёмов и водотоков содержится большое количество микроорганизмов, способствующих самоочищению этих экосистем. Исследование влияния ТМ на автохтонные бактерии, живущие в воде, является актуальным на сегодняшний день. В рамках мониторинга, проводимого на территории экологического полигона, был разработан и проведён микробиологический эксперимент, позволяющий оценить влияние различных концентраций ТМ в воде на микроорганизмы.

Опыт включал 3 варианта, которые охватывали уровни загрязнения воды ТМ: 3, 6 и 9 ПДК для рыбохозяйственных водоёмов [6]. Для опыта использовали химически чистые соли тяжёлых металлов: $ZnSO_4 \cdot 7H_2O$, $CuSO_4 \cdot 5H_2O$, $(CH_3COO)_2Pb \cdot 3H_2O$, $CdSO_4$.

Воду, отобранную из малой реки, расположенную на территории экологического полигона, исследовали на общее микробное число (ОМЧ). Результаты эксперимента приведены в таблице.

Во всех вариантах опыта наблюдается уменьшение количества колоний при увеличении концентрации тяжёлых металлов в воде. Уже в 1 опытно-варианте ОМЧ снижалось на порядок, что свидетельствует о гибели видов микробов, наиболее чувствительных к данным концентрациям. Такая ситуация может негативно отразиться на самоочищающей способности водоёма.

Проведённые комплексные исследования важнейшего компонента ландшафта Окского бассейна – малой реки свидетельствуют о значительной антропогенной нагрузке на её экосистему, обусловленной сельскохозяйственной деятельностью, на что указывают повышенное содержание ТМ в поверхностных и грунтовых водах и гидробиологические показатели. Таким образом, в ландшафтах Окского бассейна, где находится значительное количество подобных водоёмов, складывается потенциально опасная экологическая ситуация.

Литература

References

1. Безднина С.Я. Экосистемное водопользование: концепция, принципы, технологии. М.: Изд-во «Рома», 1997. 137 с.
2. Доклад об экологической ситуации в Рязанской области в 2014 году. Рязань, 2015. 139 с.
3. Евсенкин К.Н., Мажайский Ю.А., Гусева Т.М. Комплекс экологических исследований на эколопигоне в бассейне р. Оки // Биотехнические, медицинские и экологические системы и комплексы: Всерос. науч.-практ. конф. Рязань, 1998. С. 94–95.
4. Методические указания по определению тяжёлых металлов в почвах сельхозугодий и продукции растениеводства. М.: ЦИНАО, 1992. 63 с.
5. Biological monitoring of environmental pollution // Proc. of the Fourth IUBS Int. Symp. on Biomonitoring of the State of the Environment (Bioindicators) 6–8 November. 1987. Tokyo, Japan / Eds. M. Yasuno, B.A. Whitton. Tokai University Press. 1988. 291 p.
6. Нормативно-методические документы по гигиене. Серия «Гигиена окружающей среды». Выпуск № 2. «Гигиена воды». Министерство здравоохранения РФ. М., 1991. 53 с.

1. Besdnina S.Ya. Ecosystem-based water management: concept, principles, technologies. M.: Izd-vo “Roma”, 1997. 137 p. (in Russian).
2. The report on the environmental situation in the Ryazan region in 2014. Ryazan, 2015. 139 p. (in Russian).
3. Evsenkin K.N., Mazhaysky Yu.A., Guseva T.M. Ecological studies on the ekopoligon in the Oka river basin // Bioengineering, medical and ecological systems and complexes: Vseross. nauch.-pract. Konf., Ryazan, 1998. P. 94–95 (in Russian).
4. Methodical instructions on determination of heavy metals in farmland soils and crop products. M.: TsIANO, 1992. 63 p. (in Russian).
5. Biological monitoring of environmental pollution // Proc. of the Fourth IUBS Int. Symp. on Biomonitoring of the State of the Environment (Bioindicators) 6–8 November. 1987. Tokyo, Japan / Eds. M. Yasuno, B.A. Whitton. Tokai University Press. 1988. 291 p.
6. Normative-methodical documents on hygiene. Series “environmental health”. Issue №. 2. “Health water”. The Ministry of health of the Russian Federation. M., 1991. 53 p. (in Russian).

УДК 574.58: 579.68: 615.33

Изменчивость антибиотикорезистентности общих колиформных бактерий, выделенных из реки-приёмника очищенных сточных вод

© 2017. Е. А. Зацаринная, м. н. с., А. П. Круглова, к. б. н., доцент, Е. С. Ефремова, студент, В. Д. Калчугина, студент, А. С. Трунякова, студент, Рязанский государственный университет им. С. А. Есенина, 390000, Рязанская область, г. Рязань, ул. Свободы, 46, e-mail: microbiog@mail.ru, a.kruglova@rsu.edu.ru, e.efremova@rsu.edu.ru, lera.kalchugina@yandex.ru, Sasha_trunyakova@mail.ru

В статье представлены результаты изучения колиформных бактерий, выделенных из реки Листвянка (Рязанская область) в летний и осенний периоды 2016 г. Данные собраны в верхнем течении реки на трёх участках и характеризуют особенности микробных сообществ, сформировавшихся под влиянием антропогенной трансформации среды (сток нормативно очищенных коммунально-бытовых и промышленных сточных вод г. Рязани). Представлены количественные данные по распространённости и антибиотикорезистентности колиформных бактерий. Численность колиформ на обследованных участках достаточно высока и составляет от одной до несколько тысяч КОЕ/100 мл. Показано, что численность как общих (ОКБ), так и термотолерантных (ТКБ) колиформных бактерий на участке расширения реки, являющимся прудом-отстойником, достоверно выше, чем до и после очистных сооружений. В целом, содержание санитарно-показательных микроорганизмов не соответствует гигиеническим нормативам для поверхностных водных объектов в черте населённых мест: ОКБ – 500 КОЕ/100 мл, ТКБ – 100 КОЕ/100 мл. Исключение составляет только участок реки до очистных сооружений, где в осенний период численность ТКБ составила 27 КОЕ/100 мл. Проанализирована устойчивость 156 изолятов общих колиформных бактерий к 26 антимикробным препаратам. Дана количественная оценка устойчивости, в том числе множественной и экстремальной. Показано, что культуры с множественной лекарственной устойчивостью в летний период встречаются реже, чем осенью (60% и 73,6% соответственно). В районе выпуска очищенных сточных вод происходит увеличение доли микроорганизмов с множественной лекарственной устойчивостью. Выделены отдельные антимикробные препараты с наибольшей эффективностью: котримоксазол, офлоксацин, левомицетин, цефотаксим. Большинство изолятов ОКБ на всех участках реки обладают высокой устойчивостью к большинству β-лактамных антибиотиков и аминогликозидов. Доминирующих профилей резистентности не обнаружено, что свидетельствует о гетерогенности выделенных колиформных бактерий по данному признаку.

Ключевые слова: поверхностные водные объекты, общие колиформные бактерии, антибиотикорезистентность, сточные воды.

Variability of antibiotic resistance of total coliform bacteria isolated from the river that is a receiver of treated wastewater

**E. A. Zatsarinnaya, A. P. Kruglova, E. S. Efremova,
V. D. Kalchugina, A. S. Trunyakova,**

Ryazan State University n. a. S. Yesenin,
46 St. Svobody, Ryazan, Russia, 390000,

e-mail: microbiog@mail.ru, a.kruglova@rsu.edu.ru, e.efremova@rsu.edu.ru,
lera.kalchugina@yandex.ru, Sasha_trunyakova@mail.ru

The paper presents the results of studying total and fecal coliform bacteria isolated from the Listvyanka river (Ryazan region) in summer and autumn of 2016. Water samples were selected in the upper reaches of the river in three areas, they characterize the features of microbial communities formed under the influence of anthropogenic transformation of the environment (runoff of normatively treated municipal and industrial wastewater of Ryazan). Quantitative data on the prevalence of coliform bacteria and their resistance to antibiotics are represented. The number of coliforms in the surveyed area is rather high and is one or several thousand CFU per 100 ml. It was shown that the number of both total and fecal coliform bacteria in the area of the river expansion, which is a settling pond, is significantly higher than before and after the treatment facilities. Thus, the content of sanitary-indicative microorganisms does not correspond to hygienic standards for surface water reservoirs in the populated areas: total coliform is 500 CFU per 100 mL, fecal coliform is 100 CFU per 100 ml. The only exception is the section of the river that is preceding the treatment facilities, where the number of fecal coliform was 27 CFU per 100 ml in the autumn period. The 156 isolates of total coliform bacteria were tested for susceptibility to 26 antibiotics. The number of isolates with multidrug resistance and extreme resistance was defined. It is shown that cultures with multiple drug resistance in summer are less common than in autumn (60% and 73.6% respectively). In the area of treated wastewater release there is an increased amount of microorganisms with multidrug resistance. Separate antibiotics with the greatest efficiency have been identified: cotrimoxazole, ofloxacin, chloramphenicol, cefotaxime. Most total coliform isolates in all parts of the river were highly resistant to most β -lactam antibiotics and aminoglycosides. There were no dominant resistance profiles, which indicated heterogeneity of the isolated coliform bacteria as for this characteristics.

Keywords: superficial reservoirs, total coliform bacteria, antibiotics, resistance, sewage water.

Хорошо известно, что водные системы испытывают значительные объёмы нагрузки за счёт аккумуляции поступающих в них веществ поверхностного и грунтового стока, атмосферных осадков. Непосредственно в водные объекты осуществляется сброс нормативно очищенных стоков промышленных предприятий, коммунально-бытовой сети, ливневой канализации. Все эти процессы оказывают влияние на формирование и функционирование биосистем водных объектов, в том числе сообществ микроорганизмов.

На территории Рязанской области большая часть загрязняющих веществ (> 70%) поступает в бассейн Оки через реку Листвянка. Эта река является приёмником коммунально-бытовых и промышленных сточных вод города Рязани, которые в значительной мере формируют её качественный состав после прохождения городских очистных сооружений [1].

Известно, что коммунально-бытовые сточные воды, даже нормативно очищенные, способствуют быстрому распространению антибиотикорезистентности среди микроорганизмов, населяющих природные водные объекты [2]. Исследованиями, выполненными

в 2011 г., было показано, что именно в этой реке обнаружены общие колиформные бактерии с самым высоким уровнем антибиотикорезистентности и множественной лекарственной устойчивости среди обследованных водных объектов города Рязани [3].

Цель исследования: оценить уровень устойчивости к антимикробным препаратам общих колиформных бактерий, изолированных из реки Листвянка, и описать их изменчивость. В частности, произвести выделение колиформных бактерий, установить их численность, оценить уровень устойчивости изолятов к антимикробным препаратам в различные сезоны года.

Материалы и методы исследования

С целью выделения общих колиформных бактерий (ОКБ) и оценки их устойчивости к антимикробным препаратам (АМП) в июне и октябре 2016 г. были отобраны пробы воды на трёх участках р. Листвянка (Рязанская область): 1 – до очистных сооружений, 2 – пруд-отстойник очистных сооружений, представляющий собой искусственное расширение

русла самой реки, 3 – русло реки в 500 м ниже по течению от этого пруда. Выделение колиформных бактерий проводили общепринятым методом мембранной фильтрации [4]. Мембранные фильтры помещались на поверхность среды Эндо. В ходе исследований определяли численность как общих колиформных бактерий (грамотрицательные, оксидазоотрицательные, не образующие спор палочки семейства Enterobacteriaceae, ферментирующие лактозу до кислоты и газа при $t^0 = 37 \pm 1$ °C в течение 24–48 ч.), так и термотолерантных колиформных бактерий (ТКБ) (входят в число ОКБ, обладают всеми их признаками и, кроме того, способны ферментировать лактозу до кислоты и газа при $t^0 = 44 \pm 0,5$ °C в течение 24 ч.). ОКБ – это основной нормируемый показатель при оценке качества вод водоёмов в черте населённых мест, являющийся интегральным показателем степени фекального загрязнения и обладающий индикаторной надёжностью в отношении возбудителей бактериальных кишечных инфекций [4]. Видовая идентификация колиформных бактерий проводилась с помощью тест-системы для ускоренной биохимической идентификации энтеробактерий «Рapid-энтеро 200 М» (ФБУН НИИ эпидемиологии и микробиологии имени Пастера, Санкт-Петербург), которая основана на микрообъёмной технологии с использованием жидких дифференциальных сред. Из проб воды каждого створа в каждый из сезонов было выделено по 25–30 изолятов общих ко-

лиформных бактерий, которые в дальнейшем проверяли на устойчивость к антибактериальным препаратам. Определение устойчивости колиформ проводили диско-диффузным методом на среде Мюллера-Хилтона [5] в отношении 26 АМП, относящихся к десяти различным группам. Интерпретацию данных производили с использованием критериев NCCLS и программного пакета аналитической системы контроля антибиотикорезистентности «WHONET». Полирезистентными, т. е. обладающими множественной лекарственной устойчивостью, считали изоляты, нечувствительные к препаратам (≥ 1) трёх классов антибиотиков; экстремально резистентными – нечувствительные к препаратам (≥ 1) всех, за исключением одного-двух классов антимикробных препаратов [6].

Результаты и обсуждение

Распространённость общих и термотолерантных колиформных бактерий на различных участках реки Листвянка представлена в таблице 1. Во всех отобранных пробах были обнаружены колиформы, причём их численность была относительно высока (порядка нескольких тысяч КОЕ на 100 мл). Максимальные значения численности ОКБ зарегистрированы на третьем створе – русло реки в селе Реткино, т. е. ниже по течению относительно системы прудов-отстойников. В данном населённом пункте, на участках, прилегающих к району

Таблица 1

Распространённость и антибиотикорезистентность колиформных бактерий реки Листвянка

Створ	500 м до очистных сооружений		Пруд-отстойник		500 м ниже прудов	
	лето	осень	лето	осень	лето	осень
ОКБ, КОЕ/100 мл $M \pm m$	3514 \pm 356	887 \pm 268	4207 \pm 298	18500 \pm 1834	27000 \pm 3133	1320 \pm 205
ТКБ, КОЕ/100 мл $M \pm m$	1306 \pm 217	27 \pm 22	1711 \pm 248	1036 \pm 137	1423 \pm 227	1145 \pm 530
Количество выделенных изолятов ОКБ	25	25	25	27	25	30
Количество изолятов (%) с множественной лекарственной устойчивостью	14 (56%)	18 (72%)	17 (68%)	24 (89%)	14 (56%)	18 (60%)
Количество изолятов (%) с возможной экстремальной резистентностью,	9 (36%)	6 (24%)	11 (44%)	0 (0%)	6 (24%)	2 (6,6%)

Примечание: $M \pm m$ – среднее значение \pm ошибка средней.

выполнения работ, централизованная канализационная система отсутствует, а система утилизации представлена выгребными ямами, что, по-видимому, приводит к значительному поступлению колиформных бактерий в воды данного участка реки за счёт грунтовых вод с прилегающей территории. Сезонное снижение численности колиформных бактерий в осенний период наблюдается на участках реки до и после очистных сооружений, тогда как в пруду-отстойнике численность ОКБ, наоборот, увеличивается. Содержание ТКБ оказалось ниже, чем ОКБ (табл. 1).

Средний уровень содержания индикаторных микроорганизмов (ОКБ и ТКБ) на всех изученных створах не соответствовал гигиеническим нормативам [7]. Однако, зная, что река является коллектором всех сточных вод города Рязани, эти показатели не столь значительны. Так, пятилетний (2006–2010 гг.) санитарно-бактериологический мониторинг вод Нижнего Дона показал, что численность ОКБ в среднем составила 126936 ± 29121 КОЕ/100 мл [8], а в водах реки Лена, которая используется в качестве водоисточника, среднегодовые показатели ОКБ на отдельных участках достигали 40000 КОЕ/100 мл [9].

Среди ОКБ реки Листвянка до очистных сооружений (створ 1) в летний период преобладали *Enterobacter* spp., субдоминантом оказалась *Escherichia coli*, также зарегистрированы *Pantoea agglomerans*. В пруду-отстойнике идентифицированы *E. coli*, *Enterobacter* spp., *Citrobacter freundii*, *Providencia alcalifaciens*. Среди колиформ третьего створа зарегистрированы *E. coli*, *P. agglomerans* и *Klebsiella oxytoca*.

Все изоляты ОКБ (100%), выделенные в рамках данного исследования, оказались устойчивы или умеренно устойчивы к одному и более антибиотикам (табл. 1). Рассмотрение количественных показателей антибиотикорезистентности показало, что до очистных сооружений и после них культуры с множественной лекарственной устойчивостью (нечувствительные к препаратам ≥ 1) трёх классов антибиотиков) встречались практически с одинаковой частотой (по 56% в летний период, осенью – 72% и 60% соответственно), тогда как в пруду-отстойнике таких культур обнаружено больше: 68% изолятов в летний период и 89% – осенью. Кроме того, среди колиформ этой реки обнаружены изоляты с возможной экстремальной резистентностью (нечувствительные к препаратам ≥ 1) всех, за исключением одного-двух классов АМП). Сопоставление результатов данного исследова-

ния с материалами 2011 г., когда пробы воды из реки Листвянка были отобраны в летний период только на третьем створе [3], показывает, что за прошедшие пять лет количество культур с множественной лекарственной устойчивостью (полирезистентностью) осталось практически на том же уровне: 2011 г. – 45%, 2016 г. – 56% створ 3.

Выделенные изоляты на всех трёх створах проявляли высокую резистентность в отношении β -лактамовых антибиотиков (цефалоспоринов, пенициллинов, карбопенемов), особенно в отношении ампициллина, цефепима и имипенема. Это косвенно свидетельствует о широком распространении бета-лактамаз среди микроорганизмов данной группы (табл. 2). Уровень устойчивости выделенных изолятов ОКБ в отношении препаратов группы аминогликозидов также достаточно высок, причём среди общих колиформ из пруда-отстойника как в летний, так и в осенний периоды частота нечувствительных вариантов выше, чем на двух других створах. Резистентность к препаратам группы фторхинолонов оказалась значительно ниже, чем к β -лактамам и аминогликозидам. Не обнаружены (0%) нечувствительные варианты в летний период до очистных сооружений к левофлоксацину, после – к норфлоксацину. В осенний период в пруду-отстойнике не было культур, резистентных к левофлоксацину и норфлоксацину. Котримаксозол оказался одним из самых эффективных антибиотиков в отношении этой группы микроорганизмов: на первом и втором створе нечувствительные изоляты отсутствовали, на третьем – в летний период их было 20%, осенью – 17%. Культур, резистентных к полимиксину, обнаружено не было: устойчивость проявлялась только за счёт умеренных резистентов. В целом, анализ полученных данных (табл. 2) показывает, что изоляты, выделенные на участке русла из пруда-отстойника, оказались более устойчивы к отдельным антимикробным препаратам, чем микроорганизмы, встречающиеся в реке до и после сооружений.

Проведённые исследования позволили охарактеризовать распространённость общих колиформных бактерий в водах реки Листвянка и оценить их устойчивость к антибиотикам. Полученные данные позволяют показать, что в районе выпуска очищенных сточных вод происходят существенные качественные изменения микробиоценозов водных экосистем, в частности, повышается доля резистентных культур. Полученные сведения могут быть использованы и для дальнейших работ по изучению

Таблица 2

Встречаемость нечувствительных (R+I, %)* изолятов ОКБ, выделенных на отдельных участках реки Листвянка, к отдельным антимикробным препаратам

Створ	500 м до очистных сооружений		Пруд-отстойник		500 м ниже прудов	
	Лето	осень	лето	осень	лето	осень
Антибиотик						
Ампициллин	92	84	80	48	96	70
Ампициллин/сульбактам	10	52	30	0	10	83
Карбенициллин	68	–	72	–	60	–
Тикарциллин/клавулат	30	72	30	11	40	83
Цефалексин	64	–	96	–	12	–
Цефазолин	36	32	72	0	28	47
Цефуросим	64	64	48	48	28	10
Цефтазидим	48	–	60	–	20	–
Цефотаксим	36	–	0	–	0	–
Цефтриаксон	72	60	56	26	64	23
Цефепим	90	60	70	74	90	53
Имипенем	80	60	70	59	60	60
Амикацин	32	56	88	82	60	17
Гентамицин	16	32	48	59	72	37
Канамиин	52	–	72	–	56	–
Стрептомицин	40	–	12	–	36	–
Торбамицин	16	44	36	85	28	57
Ципрофлоксацин	12	44	8	33	8	23
Левифлоксацин	0	48	40	0	30	13
Норфлоксацин	40	36	10	0	0	20
Офлоксацин	16	16	56	4	4	0
Котримаксозол	0	4	0	0	20	17
Полимиксин	4	–	68	–	48	0
Фурадонин	64	52	60	59	36	13
Тертациклин	12	32	20	52	12	27
Левомецетин	–	20	–	7	–	20

Примечание: * R – резистентные культуры, I – умеренно-резистентные; прочерки обозначают, что устойчивость микроорганизмов к данным антибиотикам не оценивали.

процессов самоочищения водотоков и условий распространения физиолого-биохимических адаптаций бактерий, населяющих участки рек на разном расстоянии от источника внешнего воздействия. В частности, поскольку река Листвянка является притоком реки Ока, то можно говорить о росте потенциальной эпидемиологической опасности окских вод после впадения Листвянки за счёт широкого распространения антибиотикорезистентных культур среди представителей семейства энтеробактерий.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ и Правительства Рязанской области в рамках научного проекта № 16-44-620157 «р_а».

Литература

1. Государственный доклад о состоянии и охране окружающей среды Рязанской области в 2003 году. Рязань, 2004. 396 с.
2. Abera A., Bahiru E., Ayele L.Z. The prevalence of antibiotic resistant *Escherichia coli* isolates from fecal and water sources // Acad. J. Microbiol. Res. 2013. № 1 (1). P. 1–10.
3. Зацаринная Е.А. Оценка состояния водных объектов Рязанской области на основе анализа распределения и антибиотикорезистентности общих колиформных бактерий // Естественные и технические науки. 2014. № 1 (69). С. 60–64.
4. Санитарно-микробиологический и санитарно-паразитологический анализ воды поверхностных вод-

ных объектов. Методические указания. М.: Федеральный центр Госсанэпиднадзора Минздрава России, 2004. 41 с.

5. Определение чувствительности микроорганизмов к антибактериальным препаратам. Методические указания. М.: Федеральный центр Госсанэпиднадзора Минздрава России, 2004. 91 с.

6. Magiorakos A.P., Srinivasan A., Carey R.B., Carmeli Y., Falagas M.E., Giske C.G. Multidrug-resistant, extensively drug-resistant and pandrug-resistant bacteria: an international expert proposal for interim standard definitions for acquired resistance // Clin Microbiol Infect. 2012. № 18. P. 268–281.

7. СанПиН 2.1.5.980-00. Гигиенические требования к охране поверхностных вод. Санитарные правила и нормы. М., 2000.

8. Журавлёв П.В., Алешня В.В., Панасовец О.П., Айдинов Г.В., Швагер М.М., Митрофанова Т.В., Джайсейдинов Б.Х., Мартынов Г.А., Дервякина Е.И. Санитарно-бактериологическая характеристика вод Нижнего Дона // Гигиена и санитария. 2012. № 4. С. 28–31.

9. Анганова Е.В., Протодьяконов А.П. Оценка качества вод реки Лены по санитарно-бактериологическим показателям // Бюллетень ВСНЦ СО РАМН. 2006. № 6 (52). С. 129–131.

References

1. Federal report on the state of the environment of Ryazan region in 2003. Ryazan, 2004. 396 p. (in Russian).

2. Abera A., Bahiru E., Ayele L.Z. The prevalence of antibiotic resistant Escherichia coli isolates from fecal and

water sources // Acad. J. Microbiol. Res. 2013. № 1(1). P. 1–10.

3. Zatsarinnyaya E.A. Quality evaluation of water bodies of Ryazan region based on the analysis of distribution and antibiotic resistance of coliform bacteria // Estestvennye i tekhnicheskie nauki. 2014. № 1 (69). P. 60–64 (in Russian).

4. Sanitary-microbiological and sanitary-parasitological analysis of water of surface water bodies. Methodical instructions. M.: Federalnyy tsentr gossanepidnadzora Rossii, 2004. 41 p. (in Russian).

5. The definition of sensitivity of microorganisms to antibiotics. Methodical instructions. M.: Federalnyy tsentr gossanepidnadzora Rossii, 2004. 91 p. (in Russian).

6. Magiorakos A.P., Srinivasan A., Carey R.B., Carmeli Y., Falagas M.E., Giske C.G. Multidrug-resistant, extensively drug-resistant and pandrug-resistant bacteria: an international expert proposal for interim standard definitions for acquired resistance // Clin. Microbiol. Infect. 2012. № 18. P. 268–281.

7. SanPiN 2.1.5.980-00. Hygienic requirements to surface water protection. Sanitary rules and norms. M.: 2000.

8. Zhuravlev P.V., Aleshnya V.V., Panasovets O.P., Aidinov G.V., Schwager M.M., Mitrofanova T. V., Dzhajsejdinov B. H., Martynov G. A., Dervyakina E. I Sanitary-bacteriological characteristics of the waters of the Lower Don // Gигиена i sanitariya. 2012. № 4. P. 28–31 (in Russian).

9. Anganova E.V., Protodyakonov A.P. Estimation of quality of the Lena river waters on sanitary-bacteriological parameters // Bulletin VSNTs SO RAMN. 2006. № 6 (52). P. 129–131 (in Russian).

УДК 632.122:711.434

Влияние микрорельефа на распределение полихлорбифенилов в почвах

© 2017. Д. Ю. Аладин, н. с., Н. Ф. Деева, с. н. с., С. М. Севостьянов, к. б. н., зав. лаб., Д. В. Дёмин, к. б. н., с. н. с., Институт фундаментальных проблем биологии РАН, 142290, Россия, г. Пущино, Московская обл. ул. Институтская, 2, e-mail: aladin-danila@rambler.ru

Изучено влияние микрорельефа на перераспределение полихлорированных бифенилов (ПХБ) в слое почв 0–10 см по трём нивелирным профилям, направленным вдоль склона прируслового вала ручья Боровлянка Серпуховского района Московской области, протяжённостью 5 м и перепадом высот 30 см. Выявлены чрезвычайно высокие уровни загрязнения данным поллютантом почв на всех участках, превышение ПДК составило 1000 раз. Наименьший уровень загрязнения отмечается на повышении. В средней части полос происходит частичная аккумуляция ПХБ за счёт наличия микроповышений и микрозападин, ориентированных поперёк склона. В нижней части склонов происходит накопление загрязняющих веществ, поступающих как с вышележащих участков, так и с паводковыми водами ручья. В верхней части полос преобладают высокохлорированные группы конгенеров, в нижней – наиболее мобильные низкохлорированные ПХБ.

Ключевые слова: микрорельеф, почва, полихлорированные бифенилы, загрязнение, конгенеры.

The impact of microrelief on the distribution of polychlorinated biphenyls in soils

D. Yu. Aladin, N. Ph. Deeva, S. M. Sevostyanov, D. V. Demin,
Institute of Basic Biological Problems RAS,
2 Institutskaya St., Pushchino, Moscow Region, Russia, 142290,
e-mail: aladin-danila@rambler.ru

The article presents the research of the influence of microrelief on redistribution of polychlorinated biphenyls (PCBs) in soil layer 0–10 cm in three leveling profiles directed along the slope of the riverbed shaft of the Borovlyanka creek in Serpukhov, Moscow region. The profile length is 5 m, with 30 cm height difference. An extremely high level of soil pollution with the pollutant, 1000 times exceeding maximum permissible concentrations, have been revealed in all areas. The lowest level of pollution is noted on the rises, it ranges from 49 to 88 mg/kg of soil. The presence of micro-elevations and micro-falls leads to partial accumulation of pollutants from overlying territories on the slope. The content of PCB in soil on this part of profiles is 56–107 mg/kg. In the lower third of the bands pollutants from the parts located above are accumulated. PCBs are also additionally in-taken with stream waters and are accumulated during spring floods, in case of absence of a slope along the terrain, the level of contamination rises to 163 mg/kg. If there is a slope, no all PCBs are in-taken, as some of them are transited beyond the boundaries of the sites under investigation.

Congenetic PCB composition varies from increase to decrease: high chlorinated biphenyls prevail at the top of the shaft – from 52 to 62%, on slopes and in depressions – low-chlorinated ones. Down the slope the most mobile light fractions of PCB are transported, they are accumulated in the ultimate accumulation zone. On elevated relief elements there is no entry of pollutants, they are removed, and a slow processes of natural PCBs degradation (primarily of their light fractions) occurs under the influence of natural factors, which leads to predominance of high-graded groups of congeners in soils.

Keywords: microrelief, soil, polychlorinated biphenyls, pollution, congeners.

Городские почвы подвергаются значительно более интенсивным нагрузкам и загрязнению промышленными выбросами, чем естественные и используемые в сельском хозяйстве. Одним из примеров такой нагрузки является воздействие полихлорированных бифенилов (ПХБ) – $C_{12}H_{(10-n)}Cl_n$, где $n = 1–10$.

Надёжная пространственная оценка загрязнения почв ПХБ играет важную роль при исследовании потоков загрязняющих веществ и принятия решений при рекультивации данных территорий.

Для оценки загрязнения почв от производственных запасов и выбросов ПХБ [1, 2] и расчёта массового баланса на основе измеренных концентраций предложен ряд методик [3]. Модель разработок очень полезна для экстраполяции и полных прямых экспериментальных измерений, ограниченных в пространстве и времени [4].

Характеристики почв и их свойства сильно различаются даже в пределах небольшого пространственного масштаба и с течением времени. Поэтому ёмкость почвы, аккумулирующей стойкие органические загрязнители (СОЗ), варьирует в значительных пределах [5]. Для того, чтобы включить эту очень высокую пространственную и временную изменчивость в модели миграции и аккумуляции ПХБ, важно изучение мезо- и микромасштабных

эффектов в рельефе местности при распределении ПХБ в загрязнённых почвах.

Объекты и методы исследования

Изучение влияния микрорельефа на перераспределение ПХБ проводилось в г. Серпухове Московской области, для которого данные соединения являются приоритетными загрязняющими веществами, так как в течение 25 лет использовались на заводе «Кондесатор» в качестве диэлектрика.

Выбран участок на прирусловом валу ручья Боровлянка, который дренирует прилегающую к заводу территорию, воды которого имеют чрезвычайно высокую степень загрязнения ПХБ. Рельеф района исследований значительно преобразован хозяйственной деятельностью человека. До 2001 г. эта территория использовалась под огородные участки. В настоящее время хозяйственная деятельность на этой территории не ведётся, возобновляются природные процессы, восстанавливается растительный покров.

Заложены три полосы шириной 0,5 м, по которым произведено нивелирование по профилям протяжённостью 5 м от верхней части вала вниз по склону (рис. 1).

Расстояние между полосами 1 м. Нижняя часть полос периодически затапливается паводковыми водами ручья. Общий врез по



Работы по изучению влияния микрорельефа на перераспределение ПХБ в г. Серпухове Московской области

профилям не более 30 см, микрозападины от 5 до 20 см имеют вид борозд (остатки гряд при использовании данной территории в качестве огородов) поперёк склона прируслового вала. Профили I и II имеют средний уклон $2^{\circ}45'$ и $2^{\circ}52'$ соответственно, выполаживание в конечной части профилей продолжается. Профиль III имеет средний уклон $3^{\circ}26'$, на отрезке 4,5–5 м уклон отсутствует.

Отбор образцов проводили из верхнего слоя почвы с глубины 0–10 см. Техника взятия индивидуальной пробы состоит в том, что в месте, намеченном для выемки пробы, предварительно удаляют все остатки растений. Затем почву отрезают лопатой отвесно на глубину до 10 см в виде прямоугольной пластины. Взятую таким образом пробу тщательно перемешивают, и часть её берут в полиэтиленовый пакет.

Определение ПХБ в почвах проводили методом газожидкостной хроматографии [6] с детектором электронного захвата (ГХ-ЭЗД). Метод основан на экстракции полихлорированных бифенилов (ПХБ) и хлорорганических пестицидов (ХОП) из пробы органическими растворителями с по-

следующей сернокислотной очисткой, щелочном дегидрохлорировании и количественном определении методом газожидкостной хроматографии на хроматографе с детектором по захвату электронов. Оперативный контроль сходимости результатов измерений состава проб ПХБ проводят при получении каждого результата измерения, предусматривающего проведение параллельных определений. Количественный анализ проводили относительно пятиточечной калибровки по стандартным растворам согласно методическому указанию РД 52.18.578-97 [7].

Результаты и их обсуждение

Распределение загрязнения в почвах первой и второй полос (профили I и II) имеет одинаковые закономерности: минимальное содержание в верхней части нивелирного профиля (повышение -1,5 м по длине профиля), максимальное – в средней части (склон -1,5–4,0 м) и среднее значение в нижней части профиля (понижение -4–5 м, табл. 1, 2). Данное распределение ПХБ объясняется

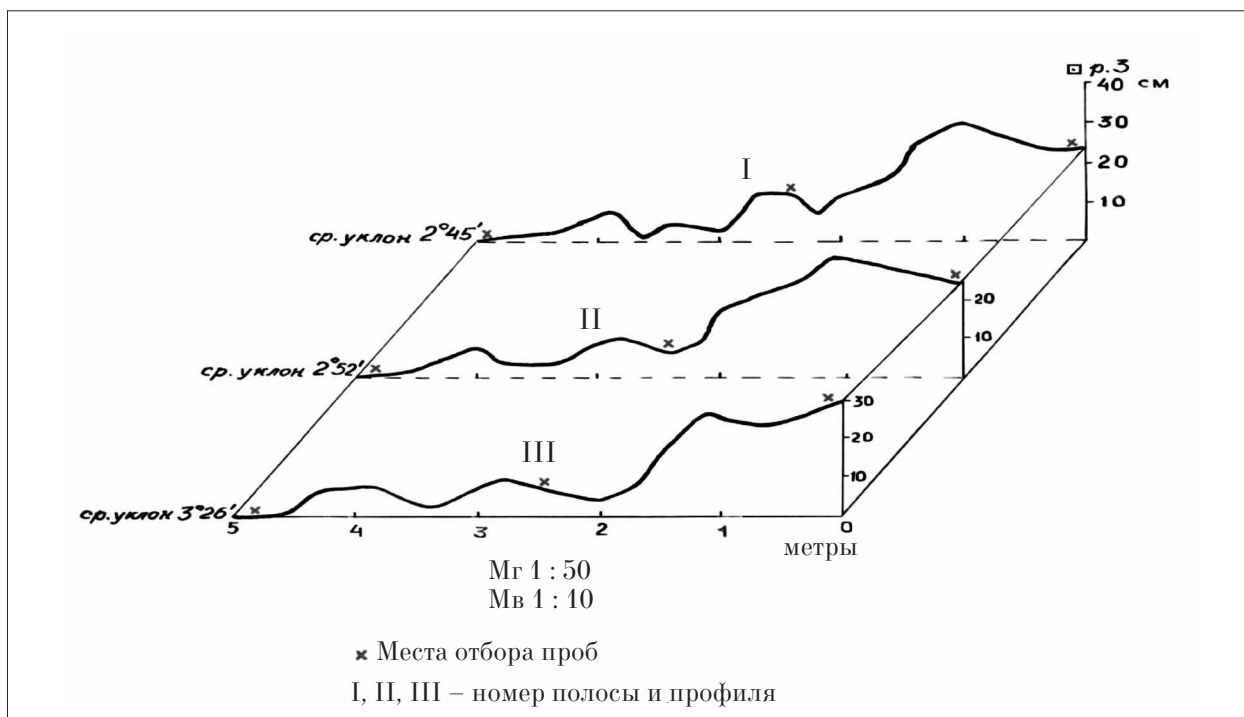


Рис. 1. Нивелирные профили поверхности опытных полос

Таблица 1

Содержание ПХБ в почвах первой полосы

Группы конгенов	Повышение		Склон		Понижение	
	мг/кг	%	мг/кг	%	мг/кг	%
C ₁₂ H ₇ Cl ₃	13,61	15,44	21,73	20,30	18,54	19,51
C ₁₂ H ₆ Cl ₄	28,43	32,25	48,19	45,03	43,57	45,84
C ₁₂ H ₅ Cl ₅	34,42	39,04	28,06	26,22	24,15	25,41
C ₁₂ H ₄ Cl ₆	10,46	11,87	8,04	7,51	7,44	7,83
C ₁₂ H ₃ Cl ₇	1,13	1,29	0,89	0,83	1,19	1,25
C ₁₂ H ₂ Cl ₈	0,10	0,12	0,12	0,11	0,16	0,17
Сумма ПХБ	88,15	100,00	107,03	100,00	95,04	100,00

Примечание: погрешность методики выполнения измерений составляет 50% [7].

Таблица 2

Содержание ПХБ в почвах второй полосы

Группы конгенов	Повышение		Склон		Понижение	
	мг/кг	%	мг/кг	%	мг/кг	%
C ₁₂ H ₇ Cl ₃	7,85	12,08	20,54	19,22	19,58	22,25
C ₁₂ H ₆ Cl ₄	18,28	28,13	47,96	44,88	41,41	47,06
C ₁₂ H ₅ Cl ₅	28,17	43,35	28,88	27,02	20,95	23,81
C ₁₂ H ₄ Cl ₆	9,48	14,59	8,16	7,64	5,41	6,15
C ₁₂ H ₃ Cl ₇	1,07	1,64	1,20	1,12	0,65	0,73
C ₁₂ H ₂ Cl ₈	0,14	0,21	0,11	0,11	0,00	0,00
Сумма ПХБ	64,97	100,00	106,85	100,00	87,99	100,00

Примечание: погрешность методики выполнения измерений составляет 50% [7].

особенностями микрорельефа выбранных территорий. Повышенные участки подвергаются меньшему воздействию паводковых вод ручья или не подвергаются вовсе.

Вместе с ПХБ могут элюироваться и другие загрязнители такие как полихлортерфенилы, иногда бутил-монохлордифениловые эфиры, изопропил-хлорбифенилы, хлорбензолы, хлоруглеводороды (пестициды), которые не идентифицируются, но включаются в общую «сумму ПХБ».

Существуют большие различия в токсичности, свойствах биоаккумуляции и биопревращения для различных конгенов ПХБ. Конгены, не содержащие атомы хлора в орто-положениях молекулы (орто-незамещённые ПХБ), могут принимать планарную конфигурацию, которая энергетически наиболее выгодна (рис. 2). Такие конгены изостереоизомерны ПХДД и ПХДФ. Молекулы орто-незамещённых ПХБ являются наиболее токсичными и оказывают действие, аналогичное действию ПХДД и ПХДФ.

Конгены с одним атомом хлора в орто-положении (моно-орто-замещённые ПХБ) демонстрируют отклонение от планарной конфигурации. Их диоксиноподобная токсичность ниже, чем у орто-незамещённых. Конгены с двумя и более атомами хлора в орто-положениях молекулы принимают глобулярную конфигурацию и обладают очень низкой токсичностью диоксинового типа.

В объектах окружающей среды – в воздухе, рыбе, донных отложениях, почве, растительных материалах обычно обнаруживается до 100 индивидуальных конгенов. Поскольку физико-химические и токсикологические свойства разных конгенов сильно различаются, необходимо конгенер-специфическое определение ПХБ. Например, изменение профиля конгенов может дать информацию о связи между структурой ПХБ и их распространением в природе или изменением в живом организме. Кроме того, если определять

ограниченное число конгенов, это может привести к недооценке общей суммы ПХБ.

Включение в расчет диоксиновой нагрузки и риска наряду с ПХДД и ПХДФ «диоксиноподобных» ПХБ внесло существенную модификацию в методики определения ПХБ. К «диоксиноподобным» относятся планарные конгены ПХБ, не содержащие атомов хлора в орто-положении и некоторые моно-орто-замещённые конгены.

При снеготаянии, ливнях с этих элементов рельефа за счёт уклона происходит вынос и плоскостной смыв ПХБ вниз по склону. В средней части склона за счёт наличия микропонижений и повышений скорость потока снижается, что приводит к частичной аккумуляции геохимического стока с верхней части прируслового вала. Кроме того, при затоплении водами ручья во время весенних паводков происходит застой воды и выпадение взвешенной фракции в микропонижениях. Во время весеннего снеготаяния и поверхностного стока при ливневых осадках происходит плоскостной и ручейковый смыв с повышенных элементов склона и также частичное выпадение взвешенных частиц, обогащённых ПХБ в микропонижениях. Нижние части склонов подвергаются более интенсивному дополнительному привносу ПХБ во время весенних разливов. Однако за счёт существующего уклона, и, соответственно, лучшей дренированности территории, происходит вынос с их поверхности растворённых и твёрдых частиц во время ливневых осадков за пределы данных полос.

При этом в количественном и качественном составе ПХБ между данными полосами имеются некоторые различия. Уровень загрязнения на повышении первой полосы выше, чем второй: 1470 ПДК (ПДК для почв 0,06 мг/кг) и 1083 ПДК соответственно (табл. 1, 2). Содержание лёгких фракций (группы конгенов с 1–4 атомами хлора) в первом случае составляет 47,73%, во втором 40,21%. На склоне содержание ПХБ на двух полосах сопоставимы между собой – 1784 и 1781 ПДК. Распреде-

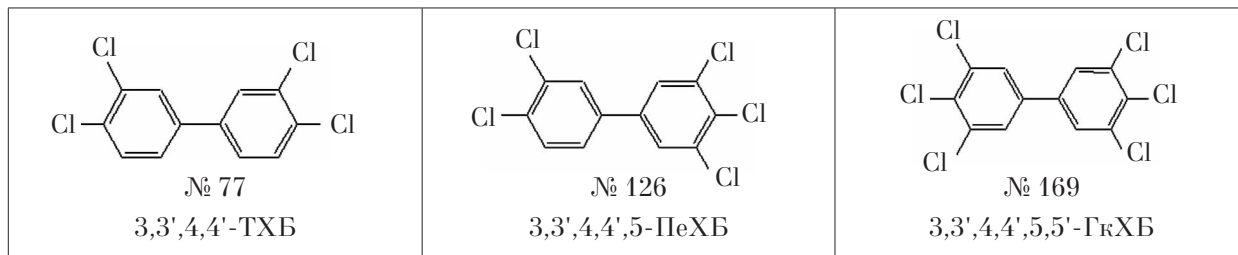


Рис. 2. Структура наиболее токсичных орто-незамещённых конгенов полихлорированных бифенилов

Таблица 3

Содержание ПХБ в почвах третьей полосы

Группы конгенов	Повышение		Склон		Понижение	
	мг/кг	%	мг/кг	%	мг/кг	%
C ₁₂ H ₇ Cl ₃	5,37	10,90	10,14	17,96	39,02	23,86
C ₁₂ H ₆ Cl ₄	13,15	26,65	22,81	40,40	82,36	50,35
C ₁₂ H ₅ Cl ₅	20,98	42,53	16,26	28,80	33,98	20,77
C ₁₂ H ₄ Cl ₆	8,40	17,04	6,00	10,63	7,68	4,70
C ₁₂ H ₃ Cl ₇	1,32	2,67	1,08	1,91	0,47	0,29
C ₁₂ H ₂ Cl ₈	0,10	0,21	0,17	0,30	0,06	0,04
Сумма ПХБ	49,32	100,00	56,45	100,00	163,57	100,00

Примечание: погрешность методики выполнения измерений составляет 50% [7].

ние гомологических групп конгенов также сопоставимо – лёгкие фракции составляют 65,3 и 64,1%. Понижения различаются по уровню загрязнения – 95,04 и 87,99 мг/кг (1584 и 1466 ПДК). Преобладают легкие фракции в составе ПХБ – 65,35% и 69,31%.

Распределение загрязнения на третьей полосе на повышении и склоне имеет те же закономерности (повышение – 49,32, склон – 56,45 мг/кг, или 822 и 941 ПДК), что на первой и второй и объясняется аналогичным строением профиля (табл. 3).

Возможно сопоставить три полосы по процентному содержанию ПХБ разной степени хлорированности как три повторности. Для ПХБ с тремя, четырьмя, пятью и шестью атомами хлора достоверная вероятность различия составляет $p = 80\%$. Для высокохлорированных бифенилов с семью и восемью атомами хлора различия недостоверны.

Соотношение гомологических групп конгенов в почвах повышения и склона также близко к почвам этих частей профилей первой и второй полос, но содержание низкохлорированных фракций в данном случае несколько ниже: 37,55% на повышении и 58,36% на склоне. Однако максимум накопления ПХБ отмечается в нижней части склона – 163,57 мг/кг, что соответствует 2726 ПДК, отмечается резкое преобладание низкохлорированных бифенилов в составе ПХБ – 74,21%. Отсутствие уклона в нижней части профиля приводит к накоплению на этом отрезке загрязняющих веществ, поступающих как с верхней части склона, так и привносимых ручьем Боровлянка.

Выводы

Для слоя почв 0–10 см по трём профилям отмечена чрезвычайно высокая степень за-

грязнения ПХБ, превышающая 1000 ПДК. Наименьший уровень загрязнения отмечен на повышении.

Наличие микрозападин приводит к частичной аккумуляции загрязняющих веществ на склоне, которые поступают как с вышележащих участков, так и привносятся паводковыми водами ручья.

Для нижней трети полос характерны процессы накопления поллютанта при отсутствии уклона по рельефу, а также возможен транзит их за пределы исследуемых участков при наличии уклона.

Конгенерный состав ПХБ меняется от повышения к понижению: на вершине вала преобладают высокохлорированные бифенилы, на склонах и в понижениях – низкохлорированные. Данное распределение уровня загрязнения и качественного состава ПХБ может быть объяснено тем, что повышения практически не подвержены действию вод Боровлянки и в почве нет дополнительного поступления ПХБ, а существует вынос вниз по склону наиболее мобильных низкохлорированных бифенилов. Происходят медленные процессы естественной деструкции ПХБ (в первую очередь лёгких фракций) под влиянием природных факторов. В почвах склонов и понижений продолжают процессы дополнительного поступления ПХБ из ручья Боровлянка и с вышерасположенных участков, за счёт чего общий уровень загрязнения возрастает, и в составе ПХБ преобладают наиболее мобильные лёгкие фракции.

Литература

1. Breivik K., Sweetman A., Pacyna J.M., Jones K.C. Toward a global historical emission inventory for selected PCB congeners – a mass balance approach. 1. Global production and consumption // *Sciences Total Environ.* 2002. P. 181–198.

2. Breivik K., Sweetman A., Pacyna J.M., Jones K.C. Toward a global historical emission inventory for selected PCB congeners – a mass balance approach. 2. Emissions // *Sciences Total Environ.* 2002. P. 181–224.

3. Meijer S.N., Steinnes E., Ockenden W.A., Jones K.C. Influence of environmental variables on the spatial distribution of PCBs in Norwegian and U.K. soils: implications for global cycling // *Environ Sciences Tech.* 2002. V. 36. P. 2146–2153.

4. Wania F., Mackay D. A global distribution model for persistent organic chemicals // *Sciences Total Environ.* 1995. V. 160 (161). P. 211–232.

5. Дёмин Д.В., Севостьянов С.М., Деева Н.Ф., Ильина А.А. Распределение и биологическая активность полихлорированных бифенилов в системе «почва-растение» при высоких уровнях загрязнения // *Теоретическая и прикладная экология.* 2007. № 3. С. 31–35.

6. Ключев Н.А., Бродский Е.С. Определение полихлорированных бифенилов в окружающей среде и биоте // *Полихлорированные бифенилы – супертоксики XXI века.* 2000. Информационный выпуск № 5. С. 31–63.

7. РД 52.18.578-97. Методическое указания суммы изомеров полихлорбифенилов в пробах почвы. Методика выполнения измерений методом газожидкостной хроматографии. Утверждены Росгидрометом 1997 г.

References

1. Breivik K., Sweetman A., Pacyna J.M., Jones K.C. Toward a global historical emission inventory for selected

PCB congeners – a mass balance approach. 1. Global production and consumption // *Sciences Total Environ.* 2002. P. 181–198.

2. Breivik K., Sweetman A., Pacyna J.M., Jones K.C. Toward a global historical emission inventory for selected PCB congeners – a mass balance approach. 2. Emissions // *Sciences Total Environ.* 2002. P. 181–224.

3. Meijer S.N., Steinnes E., Ockenden W.A., Jones K.C. Influence of environmental variables on the spatial distribution of PCBs in Norwegian and U.K. soils: implications for global cycling // *Environ Sciences Tech.* 2002. V. 36. P. 2146–2153.

4. Wania F., Mackay D. A global distribution model for persistent organic chemicals // *Sciences Total Environ.* 1995. V. 160 (161). P. 211–232.

5. Demin D.V., Sevostyanov S.M., Deeva N.F., Ilyin A.A. Distribution and biological potency polychlorobiphenyls (PCBs) in a system «soil – plant» at high levels of pollution // *Theoretical and Applied Ecology.* 2007. № 3. P. 31–35 (in Russian).

6. Klyuev S. A., Brodsky E.S. Finding of polychlorinated biphenyls in the environment and biota // *Polychlorinated biphenyls – supertoxicants of XXI century. Informationsnyy vypusk № 5.* Moskva: 2000. P. 31–63 (in Russian).

7. RD 52.18.578-97. Methodical guidance of polychlorinated biphenyls isomers amount in soil samples. Methods of measurement by gas-liquid chromatography. Approved by Federal Hydrometeorology and Environmental Monitoring Service, 1997.

Функциональная значимость петрографо-минералогического состава аллювиальных почв в распределении и миграции радионуклидов в речных бассейнах

© 2017. Н. П. Чижикова¹, Е. М. Коробова², В. Г. Линник^{2,3}, Е. С. Чечетко¹,

¹ Почвенный институт им. В.В. Докучаева, 119017, Россия, г. Москва, Пыжевский пер., 7/2,

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

³ Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, 119991, Россия, Москва, Ленинские горы, стр. 52, e-mail: chizhikova38@mail.ru

Минералогический состав аллювиальных почв, обследованных в двух геохимически контрастных речных бассейнах, загрязнённых техногенным изотопом Cs-137, рассмотрен в разрезе региональной специфики функциональной значимости глинистых минералов. Отбор образцов почв проводили в 1999–2000 гг. из почвенных разрезов, заложенных на островной и береговой пойме бассейнов рек Ипути и её притока Булдынки (Брянская область) и правосторонней пойме реки Енисея (Красноярский край). Для оптимизации точек отбора проб почвы проводили полевую гамма-спектрометрическую съёмку с помощью оригинального гамма-спектрометра КОРАД по ландшафтными профилям, секущим пойму. Учитывая специфику формирования аллювиальных почв, отбор проб проводили с учётом как морфологического строения по генетическим горизонтам, так и по отдельным аллювиальным слоям в пределах одного горизонта. Минералогический анализ илстой фракции, выделенной по Горбунову (1971), проводили для образцов с максимальной активностью Cs-137. Определение активности радиоцезия в этой фракции выполняли в лабораторных условиях на гамма-спектрометре Canberra с детектором из высокоочищенного германия. Установлены особенности и закономерности распределения радиоцезия в связи с гранулометрическим составом почвенных горизонтов и минералогическим составом илстой фракции пойменных почв. Подтверждено, что фиксация радиоцезия в почвах определяется главным образом сорбционными процессами, которые контролируются гранулометрическим и минеральным составом фракций. Показано, что образцы аллювиальных почв бассейна р. Ипуть относятся к слюда-сметитовому экоразряду, в то время как пробы из бассейна р. Енисей – к хлорит-вермикулитовому, что соответствует особенностям почвообразующих пород двух разных регионов и может привести к различному характеру и скорости вторичных процессов перераспределения радиоцезия в системе почва-вода в отдалённый период после загрязнения, что следует учитывать при радиоэкологическом мониторинге геохимически различных территорий.

Ключевые слова: петрографо-минералогическая экология, экоразряды, аллювиальные почвы, радиоцезий, слюда-сметиты, хлорит-вермикулиты.

The functional significance of petrographic and mineralogical composition of alluvial soil in distribution and migration of radionuclides in river basins

N. P. Chizhikova¹, E. M. Korobova², V. G. Linnik^{2,3}, E. S. Chechetko¹,

¹ V. V. Dokuchaev Soil Science Institute, 7/2 Pyzhevskii Pereulok, Moscow, Russia 119017,

² V. I. Vernadsky Institute of Geochemistry and Analytical Chemistry RAS, 19 Kocygina St., Moscow, Russia, 119991,

³ Moscow State University, 52 Leninskie Gory, Moscow, Russia, 119991, e-mail: chizhikova38@mail.ru

The main goal of the study was to study the role of particle size, petrographic and mineralogical composition of alluvial soils in Cs-137 fixation and to reveal its regional specificity by comparison of samples collected in floodplains of two rivers draining geochemically different areas.

Soil samples were taken in the period of 1999–2000 from soil pits located in riverside and island floodplain areas of the river Iput' (Bryansk region) and Yenisey (Krasnoyarsk region) after field gamma-spectrometry along landscape cross-sections. Silt and clay mineralogy was performed for selected specimens with a considerably higher Cs-137 activity. Field gamma-spectrometry was performed by the CORAD device developed in Kurchatov Institute. Laboratory measurements of Cs-137 activity were carried out by a Canberra gamma-spectrometer with an HP-Ge detector. Soil fine fractions were separated using Gorbunov technique (1971), mineralogical composition of fines was determined with an X-ray diffractometer (Carl-Zeiss Jena).

A comparative analysis of radiocesium distribution in alluvial soils performed in the studied regions confirmed that its fixation in soils is defined mainly by sorption processes controlled by granulometric and mineral composition of soil fractions. It is shown that samples taken from the Iput' river basin belong to mica-smectite petro-mineralogical category while specimens collected in the Yenisey river basin appertain to chlorite-vermiculite category. The finding corresponds to difference in composition of the parent rocks and their weathering. This may lead to different character and rate of the long-term secondary processes of radiocesium redistribution in the soil-water system after the contamination event that should be accounted of in radioecological monitoring of geochemically different areas.

Keywords: petro-mineralogical ecology, petro-mineralogical categories, alluvial soils, radiocesium, mica-smectites, chlorite-vermiculites.

Введение

Техногенное загрязнение речных бассейнов – одна из актуальных проблем современного почвоведения. В работе «Экологическая петрография и минералогия почв» Б. П. Градусова, А. Г. Черняховского, Н. П. Чижиковой [1] представлено научное направление – петрографо-минералогическая экология. В основе этого направления лежат обобщения по петрографо-минералогическому составу почв, поверхностных (древних и современных) отложений, кор выветривания с выделением минералогических групп, регулирующих подвижность загрязняющих химических элементов, поступающих в почвы. Роль петрографо-минералогического состава в функционировании экосистем выражена в предлагаемом понятии «разряд экосистем» (экоразряд), под которым понимается часть экосистемы, компонент которой различается петрографо-минералогическим составом, реакциями и продуктами его изменений. А название экоразрядов дается по преобладающим минералам листового вещества.

Экоразряды выделяются на основе системы блоков минерало-кристаллохимических показателей [5], которые совершенствуются и дополняются как любая системная организация. На основе минералогических показателей была составлена карта «Петрографо-экологические экоразряды в зональных экосистемах», опубликованная в атласе «Природа и ресурсы Земли» (1998г.) [4]. Предлагается выделять восемь экоразрядов, каждому из которых соответствует определенный состав минералов, различающихся по своей структуре и кристаллохимии (табл. 1).

Объекты и методы исследований

Объектом исследований являлись аллювиальные почвы бассейнов двух рек,

подвергшихся загрязнению техногенными радионуклидами в результате деятельности Красноярского горно-химического комбината (р. Енисей) и Чернобыльской аварии 1986 г. (р. Ипуть). Отбор образцов почв проводился в 1990-2001 гг. из почвенных разрезов, заложённых на островной (разрезы с индексом КР (р. Енисей) и ОЕР (р. Ипуть) и береговой (разрезы с индексом МБП р. Енисей и Булд – р. Ипуть) пойме [2, 3, 9, 10, 11, 12].

Целью исследования является определение влияния минералогического состава почв разных гранулометрических фракций на поведение радионуклидов.

Выбор разрезов и образцов для более детальных исследований определялся по результатам полевой и лабораторной гамма-спектрометрии. Минералогический анализ выполнялся для образцов, наиболее загрязнённых радиоцезием. Гамма-спектрометрия образцов в лабораторных условиях выполнена с помощью гамма-спектрометра Canberra (США) с полупроводниковым детектором из сверхчистого германия. Минералогический состав определялся в илстой фракции, выделенной по методу Н.И. Горбунова [1] с помощью универсального рентген-дифрактометра фирмы Carl-Zeiss Jena (Германия). Анализировались ориентированные препараты, насыщенные магнием в 3-х состояниях: воздушно-сухом, после сольватации этиленгликолем, после прокаливании при 550 град. С в течение двух часов.

Результаты и их обсуждение

Определение минералогического состава илстых фракций, выделенных из аллювиальных почв позволило установить, что изученные объекты относятся в двум разным экоразрядам. Образцы, отобранные в бассейне

Петрографо-минералогические экоразряды почв [1]

№ п/п	Эдафические компоненты биосферы (экоразряды)	Петрографическая характеристика пород	Породообразующая илистая составляющая
1	Пеплово-аллофановый	<i>Кайнотипные вулканогенные породы:</i> базальты, андезиты, пирокласты, среднего и основного состава и связанные с ними консолидированные и неконсолидированные полимиктовые вулканогенно-осадочные отложения	Отсутствуют
2	Хлорит-сметитовый	<i>Средние и основные палеотипные магматические породы:</i> габбро, диабаз, порфирит и их консолидированные и неконсолидированные полимиктовые осадочные дериваты	Хлорит, хлорит-вермикулит, хлорит-сметит, триоктаэдрический смектит
3	Хлорит-гидрослюдистый	<i>Кислые и средние магматические и метаморфические породы:</i> граниты, гнейсы, кристаллические сланцы и их консолидированные и неконсолидированные полимиктово-олигомиктовые осадочные дериваты	Гидрослюды ди- и триоктаэдрические, хлориты триоктаэдрические
4	Гидрослюдисто-сметитовый	Олигомиктовые карбонатные и бескарбонатные супесчано-суглинисто-глинистые отложения, в том числе покровные суглинки и лессы	Гидрослюды диоктаэдрические, слюда-сметиты диоктаэдрические, хлориты триоктаэдрические, каолинит
5	Сметитовый	Полимиктовые карбонатные и бескарбонатные глинистые и песчано-глинистые отложения	Сметиты и слюда-сметиты диоктаэдрические
6	Каолинит-гетит-гиббситовый	Элювиальные и хемогенно-осадочные железистые латериты и бокситы и продукты их переотложения и цементации	Гетит, гиббсит, каолинит
7	Каолинит-пальгорскитовый	Мономиктовые карбонатные и бескарбонатные глинистые пески и песчаные глины	Каолинит, пальгорскит, гидрослюды диоктаэдрические, слюда-сметиты, хлориты
8	Каолинитовый	Мономиктовые глины и песчаные глины	Каолинит, гидрослюды диоктаэдрические, хлориты триоктаэдрические, гетит, гиббсит

р. Ипуть относятся к слюда-сметитовому экоразряду, в то время, как пробы почв из бассейна р. Енисей – к хлорит-вермикулитовому, что соответствует особенностям почвообразующих пород двух разных регионов. В бассейне р. Енисей распространены средние и основные палеотипные магматические породы; габбро, диабазы, порфириты и их консолидированные и неконсолидированные полимиктовые осадочные дериваты. Илистая фракция представлена хлоритами, хлорит-вермикулитами, хлорит-сметитами, гидрослюдами.

Бассейн р. Ипути сложен бескарбонатными и карбонатными песчано-супесчаными и суглинисто-глинистыми моренными и флю-

виогляциальными отложениями. В илистой фракции преобладают гидрослюды двух типов, в основном диоктаэдрические с примесью триоктаэдрических, слюда-сметитовые образования с различным сочетанием пакетов слюдистого и сметитового типа. Содержание хлоритов и каолинита незначительно.

Известно, что фиксация радиоцезия в почвах определяется главным образом сорбционными процессами, которые контролируются гранулометрическим и минералогическим составом фракций [6, 7, 8 и др.]. Наши исследования подтвердили связь концентрирования радиоцезия с гранулометрическим составом аллювиальных почв (рис. 1, 2)

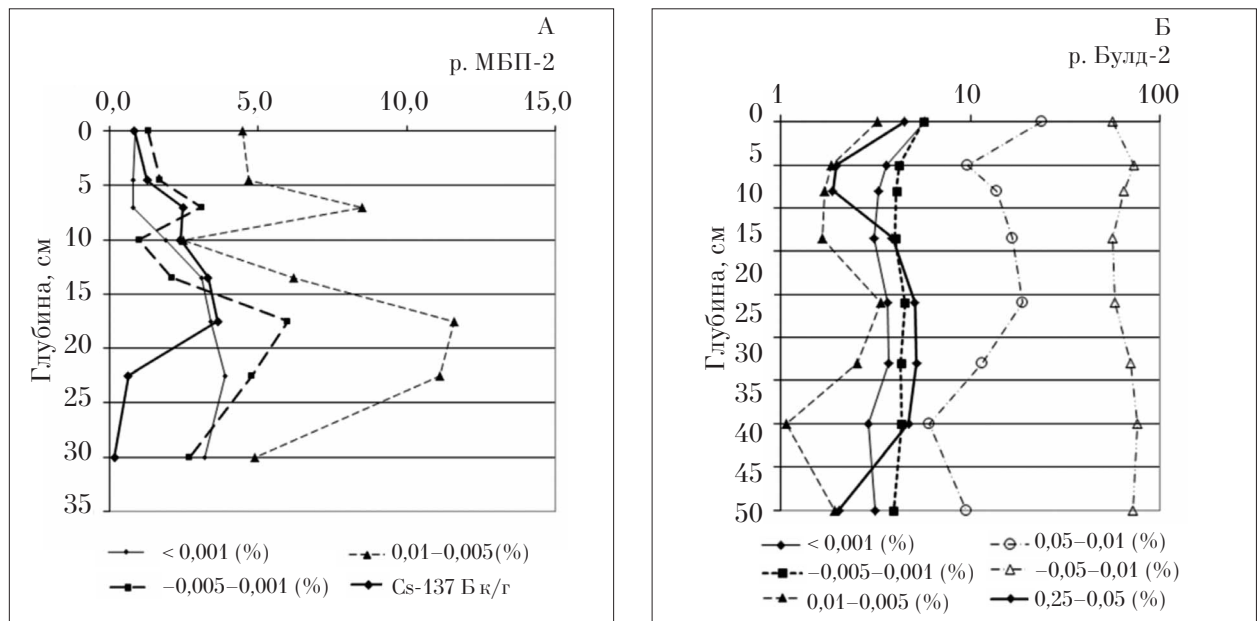


Рис. 1. Вертикальное распределение фракции разной размерности (%) и активности ¹³⁷Cs (Бк/г), в разрезах аллювиальной дерновой иловато-песчаной почвы на средней пойме р. Енисей (А, р. МБП-2) и аллювиальной дерново-глеевой на низкой пойме р. Булдынки (Б, р. Булд-2)

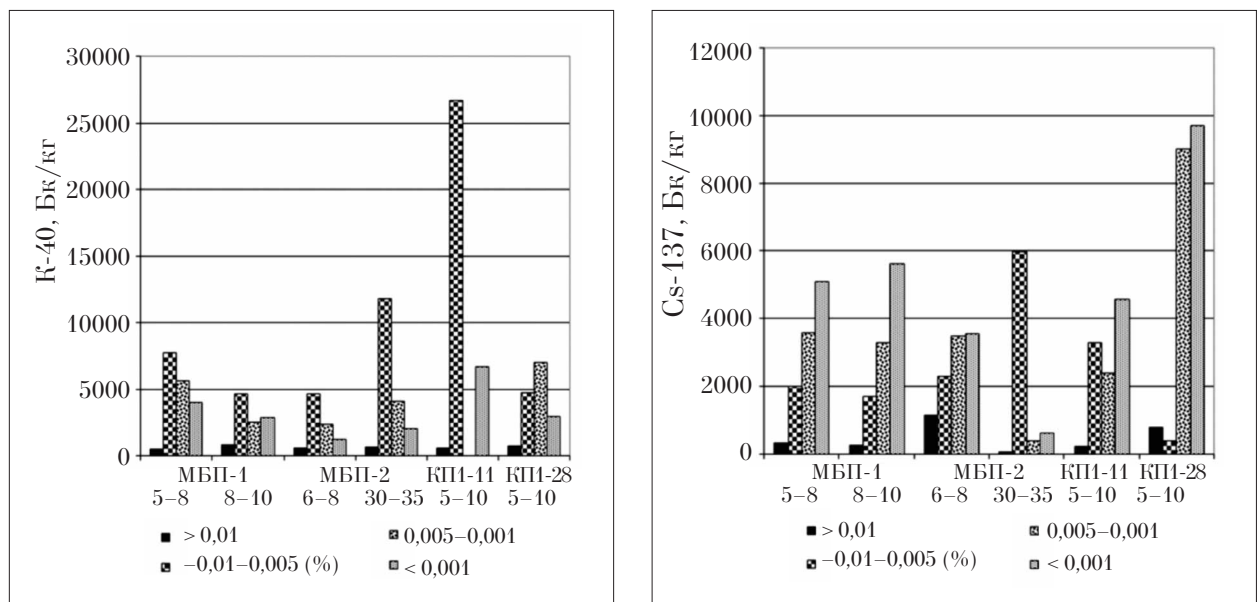


Рис. 2. Распределение радионуклидов калия-40 и цезия-137 в тонких фракциях пойменных почв (размер фракций указан в легенде в мм)

В пяти из шести образцов, отобранных в бассейне р. Енисей, максимальная удельная активность ¹³⁷Cs обнаружена в наиболее тонкой илстой фракции (табл. 2), в то время, как ⁴⁰K наиболее активно концентрируется средней и тонкой пылью. С учетом вклада каждой фракции в образец основная часть радиоцезия (47–73%) содержится в почвах во фракциях ила и тонкой пыли за исключением двух песчаных образцов МБП-2, (с глубины 6–8 см) и КПИ-11, где основная часть радионуклида

находится в доминирующих грубозернистых фракциях. С последними связано также от 53 до 92% ⁴⁰K (рис. 2).

Минералогическое различие нашло отражение в характере распределения радиоцезия по илстым фракциям, выделенных из почвенных образцов на разных глубинах (рис. 1) и в преобладании минералов определённого состава (табл. 2, 3). В бассейне р. Ипуть максимальное накопление радиоцезия ассоциировано с преобладанием в илстой фрак-

МОНИТОРИНГ АНТРОПОГЕННО НАРУШЕННЫХ ТЕРРИТОРИЙ

Таблица 2

Соотношение основных минеральных фаз фракции < 1 мкм и содержание Cs-137 в почвах р. Енисей

Местоположение разреза, почва (индекс)	Глубина, см	Содержание Cs-137			Минералы илистой фракции, %		
		общ., Бк/г	ил. фр., Бк/г	ил. фр., %	каолинит + хлорит	гидро-слоуды	смешанно-слоистые образования**
Молодая прирусловая пойма р. Енисей у пос. Б. Балчуг, дерновая глееватая песчано-суглинистая (БП4-45=МБП-1)	5-8	1,01	5,09	45,7	18	33	50
	8-10	0,94	5,62	53,0	17	48	35
Там же, средняя пойма, дерновая иловато-песчаная (БП4-1=МБП-2)	6-8	1,73	3,54	31,5	17	40	43
	30-35	0,41	0,60	14,2	32*	54	23
Высокая пойма о. Казачий, дерновая песчаная (КП1-11)	5-10	0,36	4,55	16,4	33*	49	18
Средняя пойма о. Казачий, дерновая песчаная (КП1-28)	5-10	1,96	9,71	47,5	19*	55	26

Примечание: * – преобладает хлорит, ** – хлорит-вермикулиты (сметиты).

Таблица 3

Соотношение основных минеральных фаз фракции < 1 мкм и содержание Cs-137 и $C_{орг}$ в аллювиальных почвах р. Ипуть (индекс профилей ОЕП) и её притока р. Булдынка (индекс профилей – Булд)

Индекс профиля	Индекс горизонта	Глубина, см	Каолинит + хлорит, %	Гидро-слоуда, %	Сметиты, %	¹³⁷ Cs в илистой фракции, Бк/кг	$C_{орг}$ в илистой фракции, %
ОЕП-2	AD	0-2	12	39	49	12,8	7,8
	ADA1	2-4	19	62	19	не опр.	8,7
	A1	4-6	9	46	45	80,2	8,7
ОЕП-1	AD	0-3	7	53	40	18,3	7,7
	ADA1	3-6	17	68	15	34,1	9,1
	A1	6-10	11	54	35	221,9	10,23
	A1G	10-14	24	49	27	97,4	10,2
Булд-1	A1CaSi	1-3	40	60	не опр.	38,8	8,9
	A1Ca	3-5	20	51	29	50,8	10,1
	A1G	5-7	13	53	34	не опр.	10,5
	A1G	7-9	19	53	28	не опр.	не опр.
Булд-2	A1	2-4	28	60	12	37,5	11,1
	A1	4-10	27	25	48	не опр.	8,4
	A1	13-16	17	30	53	92,1	12,1
	A1	21-26	15	33	52	75,1	10,5
	A1CG+AL	26-30	8	20	72	20,3	8,6
	A1CG	30-40	16	41	43	17,9	13,1
	A1CG+AL	40-50	15	54	31	22,1	11,6
Отложения р. Булдынка	Гумусированный илистый горизонт	0-8	15	35	51	17,5	9,5
	Донные отложения, песчаный горизонт	50-55	16	26	58	7,5	6,4

ции смектитовой фазы (смешаннослойные слюда-смектитовые образования с высоким содержанием смектитовых пакетов) (табл. 3), в то время, как в енисейских образцах – с гидрослюдистой и хлоритовой. Такое различие соответствует особенностям почвообразующих пород двух разных регионов и может привести к разному характеру и скорости вторичных процессов перераспределения радиоцезия в системе почва-вода в отдаленный период после загрязнения. Полученные результаты следует учитывать при организации и проведении радиоэкологического мониторинга геохимически различных территорий.

Выводы

1. Техногенное загрязнение радиоцезием в результате деятельности Красноярского горно-химического комбината (аллювиальные почвы бассейна р. Енисей) и после Чернобыльской аварии (аллювиальные почвы бассейна реки Ипать с её притоками) анализировалось с позиции различий в их гранулометрическом и минералогическом составе.

2. Минералогический состав аллювиальных почв бассейна реки Ипать и её притоки реки Булдынки относится к гидрослюдисто-смектитовому экоразряду, основными компонентами, которых являются гидрослюды и смешаннослойные слюда-смектитовые образования с различным сочетанием слюдистых и смектитовых пакетов, обладающих высокой сорбционной способностью и необменной межслоевой фиксацией Cs-137. Последнее затрудняет процессы десорбции радиоцезия из почвенной массы и требует специальных мероприятий по его захоронению.

3. Минералогический состав аллювиальных почв бассейна реки Енисей относится к хлорит-гидрослюдистому экоразряду, основными компонентами которого являются хлориты и гидрослюды. Хлориты по своим кристаллохимическим параметрам неспособны к межслоевой фиксации катионов. При выветривании-почвообразовании изменяется дисперсность хлорита и происходят его трансформационные превращения в хлорит-вермикулитовые (смектитовые) образования, структура которых, помимо поверхностной сорбции, частично способна к межслоевой фиксации. Однако этот процесс менее активен, чем в минералах смектитового типа.

4. Различия соответствует особенностям почвообразующих пород двух разных регионов и приводит к разному характеру и скорости процессов перераспределения радиоцезия

в системе почва-вода в отдаленный период после загрязнения. Полученные результаты следует учитывать при организации и проведении радиоэкологического мониторинга геохимически различных территорий.

Литература

1. Градусов Б.П., Черняховский А.Г., Чижикина Н.П. Экологическая петрография и минералогия почв // Сборник научных трудов: Проблемы почвоведения в Сибири. Академия наук СССР, Сибирское отделение. Институт Почвоведения и агрохимии. 1990. С. 13–34.
2. Коробова Е.М., Чижикина Н.П., Линник В.Г. Распределение радиоцезия по гранулометрическим фракциям и в профиле аллювиальных почв поймы р. Ипать и её притока р. Булдынки // Почвоведение. 2007. № 4. С. 404–412.
3. Коробова Е.М., Чижикина Н.П. Исследование связи распределения и подвижности радиоцезия в аллювиальных почвах поймы р. Ипать и ее притока р. Булдынка с минералогическим составом илистой фракции и физико-химическими параметрами почв // Почвоведение. 2007. № 10. С. 1190–1204.
4. Черняховский А.Г., Градусов Б.П., Чижикина Н.П. Карта «Петрографо-минералогические типы зональных экосистем суши» / Атлас «Природа и ресурсы земли». Из-во АН СССР, 1998.
5. Чижикина Н.П. Преобразование минералогического состава почв в процессе агрогенеза: Дисс. ... доктора с.-х. наук. М. 1992. 679 с.
6. Comans R.N.J., Yaller M., Peter De Peter. Sorption of cesium on illite: Non-equilibrium behaviour and reversibility // Geochim. Cosmochim. Acta. 1991. V. 55. P. 433–440.
7. Cornell R.V. Adsorption of cesium on minerals: a review // Journ. of Anal. and Nuclear chem. 1993. V. 171. № 2. P. 483–500.
8. Kohut C.K., Warren C.J., Chlorites. In Dixon J.B., Schulze D.G. (Ed) Soil Mineralogy with Environmental Application. Madison, Wisconsin, USA. 2002. P. 531–553.
9. Korobova E., Linnik V. and Chizhikova N. The History of the Chernobyl 137Cs Contamination of the flood plain soils and its relation to physical and chemical properties of the soil horizons (a case study) // Journal of Geochemical Exploration. 2008. V. 96. № 2–3. P. 236–255.
10. Korobova E.M., Chizhikova, N.P., Linnik V.G. Distribution of radiocesium in granulometric fractions of the Iput' floodplain soils contaminated after the Chernobyl accident // II Regional Symposium Chemistry and the Environment. Proc. Published by Serbian Chemical Society. Beograd, 2003. P. 359.
11. Korobova E.M., Chizhikova N.P., Volosov A.G. Fine particle control of radiocesium accumulation in contaminated flood plain soils // Abstracts of the 2nd Int. Meeting Clay

in Natural & Engineered Barriers for Radioactive Waste Confinement. Tours, Andra, France. 2005. P. 613–614.

12. Korobova E.M., Linnik V.G., Chizhikova N.P., Alekseeva T.N, Shkinev V.M., Brown J., Dinu M.I. Granulometric and mineralogic investigation for explanation of radionuclide accumulation in different size fractions of the Yenisey floodplain soils // *Journal of Geochemical Exploration*. 2014. V. 142. P. 49–59.

13. Korobova E.M., Linnik V.G., Chizhikova N.P., Alekseeva, T.N, Shkinev, V.M., Brown, J., Dinu, M.I. Granulometric and mineralogic investigation for explanation of radionuclide accumulation in different size fractions of the Yenisey floodplain soils // *Journal of Geochemical Exploration*. 2014. V. 142. P. 49–59.

References

1. Gradusov B.P, Chernyakhovsky A.G, Chizhikova N.P. Ecological petrography and mineralogy of soil // *Problems of soil science in Siberia*. Akademiya nauk SSSR, Sibirskoye otdelenie, Institut pochvovedeniya i agrokhimii, 1990. P. 13–34 (in Russian).

2. Korobova E.M. Chizhikova N.P., Linnik V.G. Distribution of radiocesium in granulometric fractions and in the profile of alluvial soil in the Iput' floodplain soils and in its tributary the Buldynka river // *Pochvovedeniye*. 2007. № 4. P. 404–412 (in Russian).

3. Korobova E.M., Chizhikova N.P. The research of the connection of distribution and mobility of radiocesium in the alluvial soil of the Iput' floodplain and in its tributary the Buldynka river with the mineralogical content of sediment fraction and with physical-chemical parameters of soil // *Pochvovedeniye*. 2007. № 10. P. 1190–1204 (in Russian).

4. Chernyakhovsky A.G., Gradusov B.P., Chizhikova N. P. Map "Petrographic and mineralogical types of zonal ecosystems" / Atlas "Nature and resources of the earth". Izd-vo AN SSSR Academy of Sciences, 1998 (in Russian).

5. Chizhikova N.P. Transformation of soil mineralogy due to agrogenetic impact: Diss. ... doktora s.-kh. nauk. M., 1998. 648 p. (in Russian).

6. Comans R.N.J., Yaller M., Peter De Peter. Sorption of cesium on illite: Non-equilibrium behaviour and reversibility // *Geochim. Cosmochim. Acta*. 1991. V. 55. P. 433–440.

7. Cornell R.V. Adsorption of cesium on minerals: a review // *Journ. of Anal. and Nuclear chem*. 1993. V. 171. № 2. P. 483–500.

8. Kohut C.K., Warren C.J., Chlorites. In Dixon J.B., Schulze D.G. (Ed) *Soil Mineralogy with Environmental Application*. Madison. Wisconsin. USA. 2002. P. 531–553.

9. Korobova E., Linnik V. and Chizhikova N. The History of the Chernobyl 137Cs Contamination of the flood plain soils and its relation to physical and chemical properties of the soil horizons (a case study) // *Journal of Geochemical Exploration*. 2008. V. 96. № 2–3. P. 236–255.

10. Korobova E.M, Chizhikova, N.P., Linnik V.G. Distribution of radiocesium in granulometric fractions of the Iput' floodplain soils contaminated after the Chernobyl accident // *II Regional Symposium Chemistry and the Environment*. Proc. Published by Serbian Chemical Society. Beograd, 2003. P. 359.

11. Korobova E.M, Chizhikova N.P., Volosov A.G. Fine particle control of radiocesium accumulation in contaminated flood plain soils // *Abstracts of the 2nd Int. Meeting Clay in Natural & Engineered Barriers for Radioactive Waste Confinement*. Tours, Andra, France. 2005. P. 613–614.

12. Korobova E.M., Linnik V.G., Chizhikova N.P., Alekseeva T.N, Shkinev V.M., Brown J., Dinu M.I. Granulometric and mineralogic investigation for explanation of radionuclide accumulation in different size fractions of the Yenisey floodplain soils // *Journal of Geochemical Exploration*. 2014. V. 142. P. 49–59.

13. Korobova E.M., Linnik V.G., Chizhikova N.P., Alekseeva, T.N, Shkinev, V.M., Brown, J., Dinu, M.I. Granulometric and mineralogic investigation for explanation of radionuclide accumulation in different size fractions of the Yenisey floodplain soils // *Journal of Geochemical Exploration*. 2014. V. 142. P. 49–59.

Влияние соотношения C:N на разложение фитомассы кукурузы при изменении содержания эндогенного и экзогенного азота

© 2017. А. К. Квиткина¹, м. н. с., А. А. Ларионова¹, к. б. н., доцент, в. н. с., Д. М. Дударева², магистрант, С. С. Быховец^{1,2}, к. г. н., старший преподаватель, в. н. с.,

¹Институт физико-химических и биологических проблем почвоведения РАН, 142290, Россия, Московская обл., г. Пушкино, ул. Институтская, 2,

²Пушкинский государственный естественно-научный институт, 142290, Россия, Московская обл., г. Пушкино, проспект Науки, 3,
e-mail: aqvia@mail.ru, darya_dudareva@mail.ru

В длительных лабораторных опытах изучали влияние снижения отношения C:N за счёт эндогенного и экзогенного азота на разложение растительных остатков кукурузы: без внесения азота извне (опыт с эндогенным азотом), а также с внесением KNO_3 и NH_4NO_3 . Скорости минерализации лабильных и устойчивых пулов углерода в растительных остатках (РО) оценивали по уравнению двойной экспоненты аппроксимацией кумулятивной кривой эмиссии CO_2 при разложении РО за 365 сут. Было показано, что снижение C:N усиливало минерализацию РО на ранних стадиях разложения. Накопление эндогенного азота в РО увеличило константу разложения лабильного органического вещества (k_1). Экзогенный минеральный азот существенно увеличил скорость минерализации РО. При внесении KNO_3 , наряду с k_1 , происходило увеличение размера лабильного пула (A_1). Поступление NH_4NO_3 воздействовало на все параметры модели, включая и константу разложения устойчивого пула (k_2), а также привело к максимальной трансформации РО и увеличению индекса гумификации алкил/O-алкил с 0,33 до 0,51. Таким образом, отношение C:N, источник азота и форма, в котором азот включается в процесс деструкции опада, оказывают влияние на константы минерализации, размер лабильного пула и состав продуктов гумификации.

Ключевые слова: минерализация растительных остатков, CO_2 , экологическая стехиометрия, C:N, константы разложения, гумификация.

Effect of C:N ratio and external and internal nitrogen on mineralization rate of corn residues

A. K. Kvitkina¹, A. A. Larionova¹, D. M. Dudareva², S. S. Byhovets^{1,2},

¹ Institute of Physicochemical and Biological Problems in Soil Science of the Russian Academy of Sciences,

2 Institutskaya St., Pushchino, Moscow region, Russia, 142290,

² Pushchino State Institute of Natural Sciences,

3 Prospect Nauki, Pushchino, Moscow region, Russia, 142290,

e-mail: aqvia@mail.ru, darya_dudareva@mail.ru

The impact of C:N and of internal and external nitrogen on plant residues (corn leaves) decomposition was studied in a series of long-term laboratory incubation experiments: without nitrogen addition (internal organic and inorganic N), with KNO_3 and NH_4NO_3 addition (external N). Mineralization rates of the labile and the recalcitrant carbon pools were estimated by fitting 365-day cumulative CO_2 losses by double-pool exponential decay function. It has been shown that decrease of C:N leads to stimulated mineralization at the early stages of decomposition (first 20 days of incubation). The value of C:N affects the k_1 parameter of the double exponential decay model of plant residues. The decomposition constant of the labile carbon pool directly depends on C:N in the C:N range from 22 to 62, but decreases under the stress of high doses of internal (C:N = 22) and external (C:N = 10) nitrogen. The internal organic nitrogen affected the decay constant (k_1) of the labile pool only. KNO_3 as an external N form influenced the size (A_1) and k_1 value of the labile pool. NH_4NO_3 affected all the parameters of the double exponential decay including constant (k_2) of the recalcitrant pool, and also resulted in intensive transformation of plant residues (humification index alkyl/O-alkyl increased from 0.33 to 0.51). Thus, mineralization and humification of plant residues depends on C:N ratio, origin and form of available nitrogen. The internal nitrogen in plants and the external nitrogen (KNO_3 and NH_4NO_3) affect in the same direction, but the effect of external nitrogen is more pronounced than of internal, and of ammonium nitrogen is more than that of nitrate nitrogen.

Keywords: mineralization, CO_2 , ecological stoichiometry, C:N ratio, decay rates, humification.

Минерализация растительного опада – ключевой процесс круговорота углерода, определяющий скорость эмиссии углекислого газа и поступление питательных элементов в почву. Разложение растительных остатков (РО) зависит как от гидротермических факторов окружающей среды, так и от структуры сообщества организмов-деструкторов, и качества опада: содержания лигнина, концентрации азота и отношения С:N в опаде [1–6]. Почвенные циклы углерода и азота взаимосвязаны. Для органического вещества почвы характерны низкие величины С:N в диапазоне 11–17, поэтому его разложение в первую очередь лимитируется запасами лабильного углерода [5]. В отличие от органического вещества почвы отношение С:N в разных фракциях опада варьирует от 20 до 600, то есть для разложения богатого углеродом опада организмам-деструкторам требуется азот. Поэтому разложение опада, его минерализация до CO_2 и гумификация, то есть трансформация в органическое вещество почвы, наиболее чувствительны к добавлению азота.

При современных темпах роста вовлечения азота в биогеохимический круговорот является актуальной оценка влияния соединений азота на процессы минерализации лабильного и устойчивого углерода в почве [2, 7]. При рассмотрении процессов разложения РО мы предлагаем различать эндогенный и экзогенный азот. Эндогенный азот в растениях находится преимущественно в органической форме в составе аминокислот, амидов, аминокислот и белков, а также может накапливаться в минеральной форме при выращивании в условиях избытка азотных удобрений. Под экзогенным азотом мы понимаем азот, поступающий при разложении РО извне, с удобрениями или с атмосферными выпадениями преимущественно в аммиачной и нитратной формах.

Целью нашей работы было сравнить воздействие С:N за счёт эндогенного и экзогенного азота на разложение и гумификацию растительных остатков. В задачи исследования входили сравнительный анализ влияния органического (эндогенного), аммонийного и нитратного (экзогенного) азота на скорость минерализации растительных остатков кукурузы в ряду снижения соотношения углерода к азоту от С:N=62 до С:N=22 и 10, и оценка индексов гумификации РО.

Методика исследования

В инкубационных экспериментах использовали кукурузу, выращенную в условиях

обеднённого, нормального и обогащённого азотом питания. РО (100 мг) инкубировали в смеси отмытого HCl песка (900 мг) с иллитом (100 мг) при 22 °С, 80% ППВ. Пробы инокулировали водной суспензией (100 мкл) из чернозёма выщелоченного, приготовленной в соотношении вода:почва = 10:1.

В опыте А изучали влияние эндогенного азота: листья кукурузы с С:N 22, 34, 47 и 62 инкубировали без добавления азота (варианты 22А, 32А, 47А, 62А). В листьях 22А эндогенный азот был равномерно распределён между органической и нитратной формами. В опыте Б использовали растительные остатки с С:N 62, к которым последовательно добавляли возрастающие количества NH_4NO_3 и доводили соотношение С:N до 47, 32, 22 и 10 (варианты 47Б, 34Б, 22Б, 10Б). В опыте В соотношение С:N регулировали внесением KNO_3 в исходные растительные остатки с С:N 62 (варианты 47В, 22В).

Газовые пробы отбирали на 1, 3, 5, 7, 10 сут, далее еженедельно или реже в течение 365 сут (после 30 сут пробы отбирали раз в 10–30 сут, после 180 сут раз в 30–60 сут, в соответствии с экспоненциальным снижением эмиссии CO_2). После отбора флаконы проветривали. Интенсивность дыхания вычисляли по накоплению CO_2 в интервалах между отборами газовых проб. Минерализацию органического вещества ($C_{\text{мин}}$) определяли как кумулятивную эмиссию углекислого газа ($C\text{-CO}_2$), рассчитанную в процентах от внесённого углерода (C_0):

$$C_{\text{мин}} = C\text{-CO}_2 / C_0 \cdot 100\%. \quad (1)$$

Кумулятивную кривую эмиссии CO_2 аппроксимировали за период эксперимента с помощью уравнения:

$$C_{\text{мин}} = 1 - A_1 e^{-k_1 t} - (1 - A_1) e^{-k_2 t}, \quad (2)$$

где A_1 – доля лабильного пула, k_1 и k_2 – константы скоростей разложения лабильного и устойчивого пулов углерода растительных остатков кукурузы.

Уравнение аппроксимировали, используя алгоритм Марквардта. Концентрацию CO_2 определяли на газовом хроматографе «Кристаллюкс-4000». Содержание $C_{\text{орг}}$ и $N_{\text{общ}}$ определяли с помощью элементного HCNS-анализатора Vario EL III («Elementar», Германия). Структурные фрагменты ОВ исследовали методом твёрдофазного ^{13}C -ЯМР. ^{13}C -ЯМР спектры опадов были получены на спектрометре BRUKER AVANCE-II NMR

400. Для расшифровки спектры разделяли на диапазоны, соответствующие различным структурным фрагментам [3, 4]: 0–45 ppm – незамещённые алкилы (алифатические фрагменты); 45–110 ppm – O-алкильные группы углеводов; 110–160 ppm – незамещённые и O-замещённые (фенольные) ароматические фрагменты (арилы); 160–220 ppm – карбонилы COOH-групп, альдегидов и кетонов.

Данные анализировались в Statistica 6.0 (ANOVA, по Тьюки ($p < 0,01$)). На графиках приведены стандартные отклонения ($n = 3$).

Результаты и обсуждение

При разложении растительных остатков наибольшая скорость эмиссии CO_2 во всех трёх опытах наблюдалась в первые 30 сут инкубации (рис. 1). За это время минерализовалось около половины всего углерода, эмитированного за 365 сут инкубации. Минимальная скорость наблюдалась при разложении РО с $C:N=62$ без внесения минерального азота. Наибольшая скорость разложения РО наблюдалась при $C:N=22$ после внесения нитрата аммония (рис. 1).

Поскольку влияние азота на скорость минерализации неодинаково для различающихся по устойчивости пулов, зависимость между скоростью разложения и величиной $C:N$ оценивали отдельно для лабильного и устойчивого пула. В нашем эксперименте минерализацию фитомассы в микрокосме хорошо описывает двупуловая модель (уравнение 2). Согласно биохимическому анализу растений [1, 5], лабильный пул с константой разложения k_1 представлен соединениями с большим содержанием азота и низким содержанием лигнина и полифенолов – белками,

моно- и олигосахаридами, также в лабильный пул входят микробная биомасса и низкомолекулярные продукты микробного метаболизма. Устойчивый пул с константой разложения k_2 , напротив, отличается высоким содержанием целлюлозы, лигнина и полифенолов, большими значениями $C:N$ и лигнин:N. Также к устойчивому пулу относятся устойчивые микробные метаболиты и продукты гумификации фитомассы.

По результатам эксперимента, форма азота оказала существенное влияние на величину A_1 : совместное внесение аммонийной и нитратной форм экзогенного азота привело к увеличению лабильного пула в 1,9–2,2 раза (рис. 2 А), тогда как присутствие только нитратного экзогенного и эндогенного азота увеличило размер A_1 в 1,6 раза (рис. 2 А). Аналогичный результат был отмечен в работе [1], где в листьях с исходно высоким содержанием азота размер лабильного пула органических веществ был больше, чем в листьях с низким содержанием азота. Константы разложения устойчивого пула (рис. 2 В) не обнаруживали зависимости от $C:N$, за исключением опыта с внесением нитрата аммония. В отличие от других форм азота, внесение NH_4NO_3 ускоряло минерализацию устойчивого пула растительных остатков в 3,3 раза – время разложения, рассчитанное как величина, обратная константе разложения ($T=1:k_2$), снизилось с 8,7 до 2,7 лет.

Таким образом, увеличение содержания органического эндогенного азота до $C:N=47$ и $C:N=34$ повысило только скорость разложения лабильного пула. Добавление экзогенного нитратного азота до $C:N=47$ и $C:N=22$ увеличило как скорость разложения, так и размеры лабильного пула. К увеличению этих двух параметров привело и высокое содержание

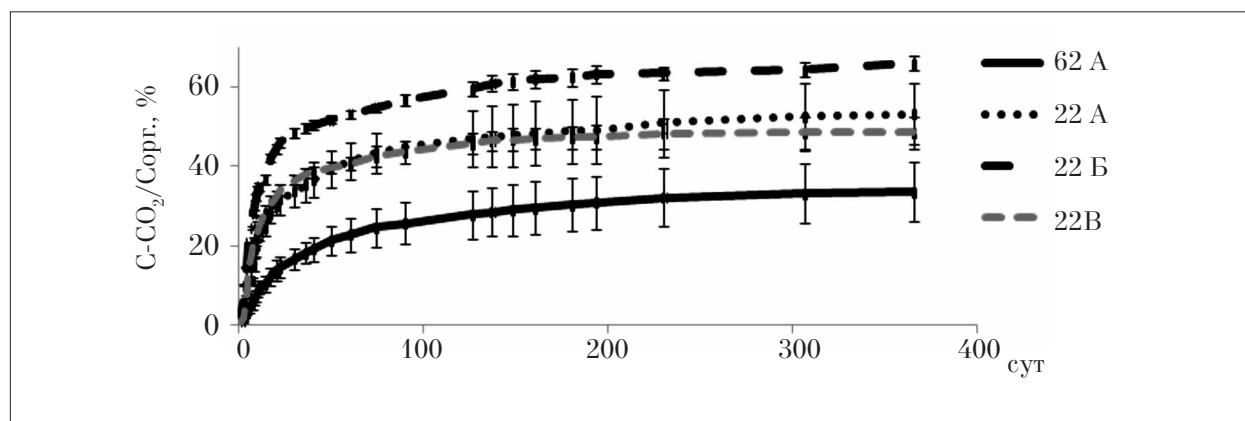


Рис. 1. Кумулятивные потери углерода, выраженные в % от внесённого углерода, при разложении исходных растительных остатков ($C:N=62$, опыт А) и растительных остатков с $C:N=22$: без добавления азота (22 А), с добавлением NH_4NO_3 (22 Б), с добавлением KNO_3 (22 В) за 365 сут

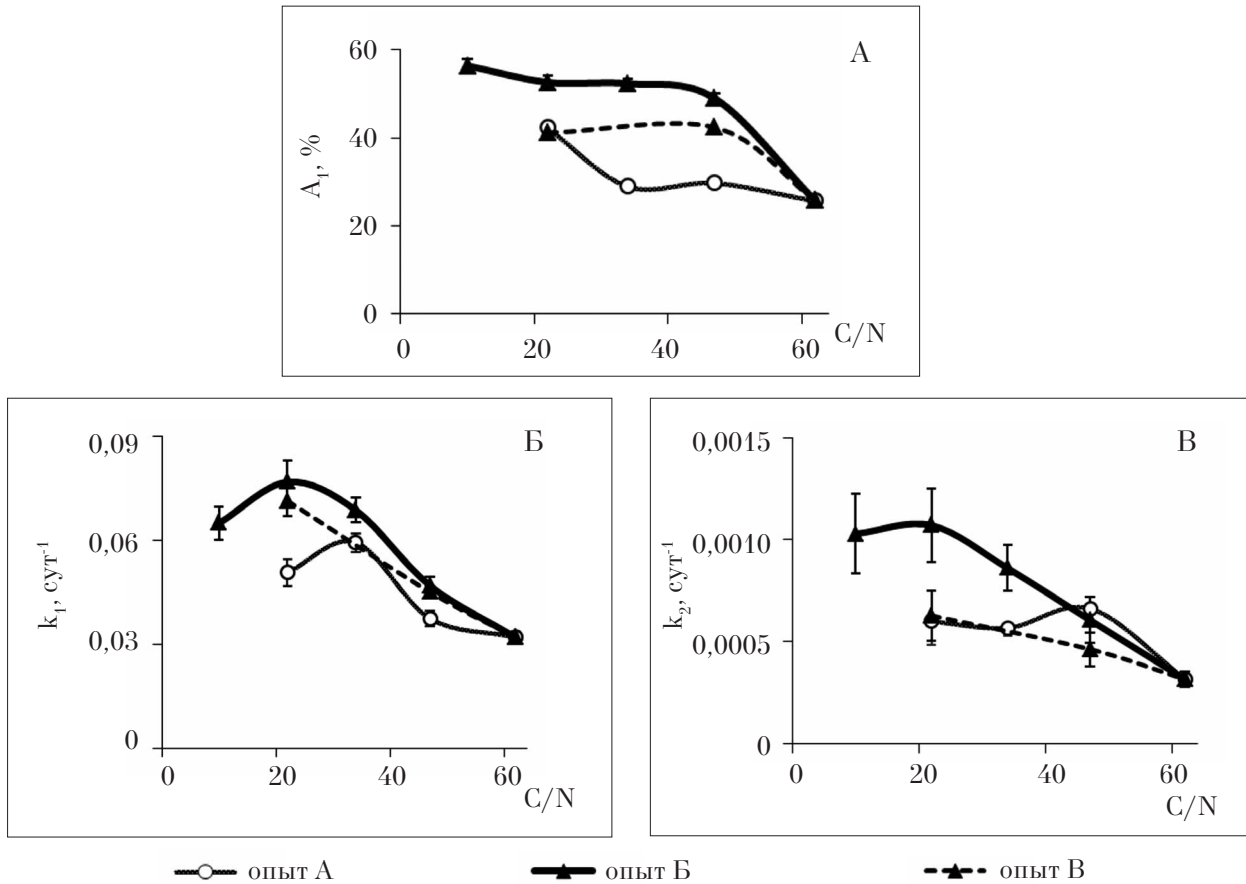


Рис. 2. Параметры двухпуловой модели минерализации РО: (А) A_1 – размер лабильного пула (% от $C_{\text{орг}}$), (Б) k_1 – константа минерализации лабильного пула, сут^{-1} , (В) k_2 – константа минерализации устойчивого пула, сут^{-1} . Варианты: опыт А – растительные остатки (РО), опыт Б – (РО + NH_4NO_3), опыт В – (РО + KNO_3)

эндогенного азота C:N=22. Одновременное внесение в систему экзогенного аммонийного и нитратного азота наряду с увеличением размера и скорости разложения лабильного пула повысило скорость разложения устойчивого пула.

Определение структурных фрагментов углерода в РО кукурузы показало, что источник азота существенно влияет на процессы гумификации (рис. 3 А). После годового инкубирования РО кукурузы (вариант 62А) произошли значительные изменения в структуре органического вещества: снизилась доля углеводных О-алкилов с 80 до 60% от $C_{\text{орг}}$ и примерно в 2 раза возросла доля алкильных и ароматических групп. Доля карбонильных групп при этом существенно не увеличилась. Внесение экзогенного азота привело к ещё более значительной трансформации органического вещества исходных РО за счёт изменения содержания карбонильных и алкильных групп. Внесение нитратной и аммонийной форм (вариант 22Б) увеличило долю алкилов с 20 до 27% и вклад карбонильных групп с 5

до 8% по сравнению с вариантом 62А соответственно (рис. 3). Добавление экзогенного азота только в виде нитратной формы (22В) оказало меньшее влияние на процесс трансформации ОВ и увеличило долю только карбоксильных групп по сравнению с вариантом 62А.

Индексы гумификации по разному реагируют на источники и форму внесения азота. Расчёт отношения арил/О-алкил (рис. 3 Б), свидетельствует об увеличении степени ароматичности продуктов гумификации РО независимо от источника азота. Отношение алкил/О-алкил, напротив, существенно зависит от формы азота: максимальное значение этого индекса гумификации наблюдается при внесении обеих минеральных форм азота, тогда как минимальное значение отмечено в варианте с внесением экзогенного KNO_3 . Известно, что азот способствует интенсивной гумификации опада, причём повышение степени ароматичности органического вещества обычно связывают с подавлением лигнинолитических ферментов, т. е. с увеличением доли устойчивого

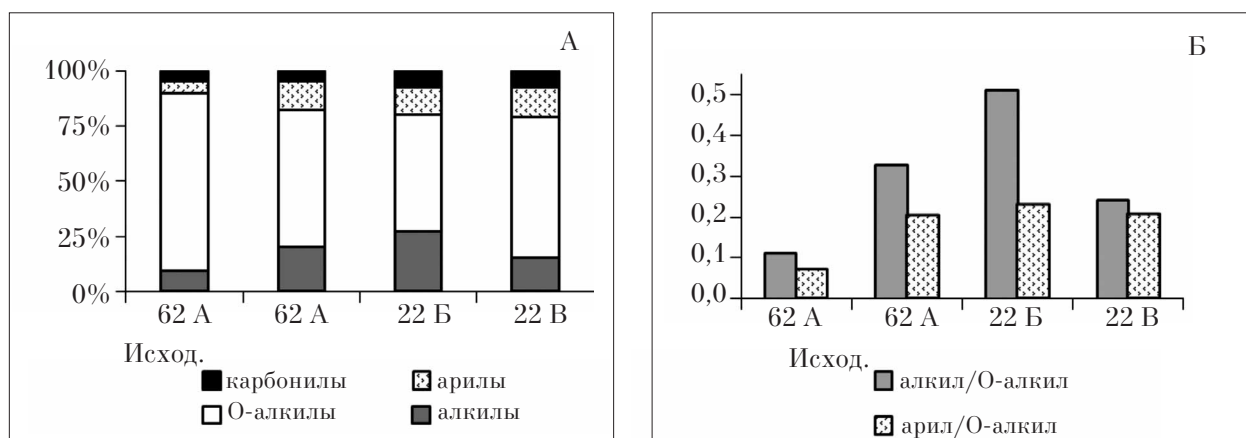


Рис. 3. Состав исходных растительных остатков и продуктов их разложения: (А) распределение углерода по структурным фрагментам по данным ¹³С-ЯМР спектроскопии, в % от С орг., (Б) индексы гумификации

лигнина в продуктах гумификации. В наших исследованиях, напротив, стимулирование гумификации внесением азота сопровождалось увеличением не степени ароматичности, а другого индекса гумификации – отношения алкил:О-алкил (рис. 3 Б).

Таким образом, источник азота (эндогенный или экзогенный), форма, в которой азот поступает в почву и включается в процесс деструкции опада (органическая, нитратная, аммонийная формы) и С:N оказывают влияние на константы минерализации углерода, размер его лабильного пула и качественный состав продуктов гумификации РО кукурузы. В известных из литературы моделях углеродного цикла влияние всех форм азота на интенсивность минерализации растительного опада предполагается одинаковым. По результатам настоящего исследования влияние формы и источника азота, наряду с его количеством и С:N, должно учитываться в математических моделях, описывающих разложение РО.

Заключение

В инкубационных экспериментах по разложению листьев кукурузы была установлена обратная зависимость эмиссии CO₂ от С:N на ранних стадиях разложения (в пределах 20 сут инкубации), нивелирующаяся со временем.

Величина С:N влияет на параметры двухпуловой модели разложения растительных остатков. Константы разложения лабильного пула углерода напрямую зависят от С:N в интервале С:N от 22 до 62, но снижаются под действием высоких доз экзогенного (С:N 10) и эндогенного (С:N=22) азота.

Минерализация растительного опада зависит не только от С:N, но и от источника, и формы доступного азота. Эндогенный азот, входящий в состав растений, и экзогенный, добавленный в виде NH₄NO₃ и KNO₃, действуют в одинаковом направлении, но эффект от экзогенного азота выражен сильнее, чем от эндогенного, а от аммонийного сильнее, чем от нитратного.

Увеличение содержания эндогенного органического азота повышает константу разложения лабильного пула углерода (k₁). Экзогенный нитратный азот увеличивает как размер лабильного пула углерода (A₁), так и константу его разложения (k₁). Внесение NH₄NO₃ воздействует на все параметры модели, описывающей деструкцию растительных остатков, и приводит к ускорению разложения и лабильного, и устойчивого пула углерода РО.

Внесение аммонийной формы азота приводит к максимальному преобразованию РО, накоплению ароматического и алифатического углерода в продуктах трансформации, и высоким индексам гумификации: алкил/О-алкил 0,51 и арил/О-алкил 0,23.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (гранты № 14-04-01738, № 14-04-01884, № 17-04-01933) и РНФ (№ 14-14-00625).

References

- Hobbie S., Eddy W., Buyarski C., Adair C., Ogdahl M., Weisenhorn P. Response of decomposing litter and its microbial community to multiple forms of nitrogen enrichment // Ecological monographs. 2012. V. 82 (3). P. 389–405.
- Knorr M., Frey S.D., Curtis P.S. Nitrogen additions and litter decomposition: a meta-analysis // Ecology. 2005. V. 86. P. 3252–3257.

3. Kogel-Knabner I. The macromolecular organic composition of plant and microbial residues as inputs to soil organic matter // *Soil Biology and Biochemistry*. 2002. V. 34. P. 139–162.

4. Larionova A.A., Zolotareva B.N., Kvitkina A.K., Kudayarov V.N., Kolyagin Y.G., Kaganov V.V. Composition of structural fragments and the mineralization rate of organic matter in zonal soils // *Eurasian Soil Science*. 2015. V. 48. № 10. P. 1110–1119.

5. Orlov D.S. *Soil chemistry*. Rotterdam: Balkema Publishers, 1992. 390 p.

6. Semenov V.M., Ivannikova L.A., Kuznetsova T.V., Semenova N.A. The role of plant biomass in the formation of the active pool of soil organic matter // *Eurasian Soil Science*. 2004. V. 37. № 11. P. 1196–1204.

7. Zhang D., Hui D., Luo Y., Zhou G. Rates of litter decomposition in terrestrial ecosystems: global patterns and controlling factors // *J. of Plant Ecology*. 2008. V. 1. P. 85–93.

УДК [574+575+581.48]:635.621.8

Эколого-генетический анализ морфометрических признаков семени *Cucurbita pepo* var. *giramontia* Duch.

© 2017. В. Ф. Хлебников, д. с-х. н., профессор,
Н. В. Смурова, преподаватель,

Приднестровский государственный университет им. Т. Г. Шевченко,
3300, Приднестровье, г. Тирасполь, ул. 25 Октября, д. 128,
e-mail: v-khl@yandex.ru, natava.smurova@yandex.ru

Объектами исследования являлись 5 родительских форм кабачка овощного *Cucurbita pepo* var. *giramontia* Duch. и 20 гибридов F_1 , созданных в НИЛ «Биоинформатика» ПГУ, близких по скороспелости, но различающихся по размеру семян. Предмет исследований – изменчивость морфометрических признаков (масса, длина, ширина и толщина) семени в градиенте условий репродукции (7 лет). Для характеристики изменчивости условий вегетации семенников использовали индексы среды, рассчитанные по массе семени. Генетический анализ изменчивости и наследования признаков провели с использованием экспериментального материала, полученного по схеме полного диаллельного скрещивания (5×5). Изменчивость морфометрических признаков семян в исследованиях, проведенных в 2005–2012 гг., определяют, в первую очередь, гидротермические условия года репродукции вследствие ротации посевов на участках одного поля, генотипические факторы и характер взаимодействия «генотип-среда». Регрессионный анализ выявил достаточно очевидную роль генотипа. Наибольшей отзывчивостью на условия года репродукции характеризуются масса и ширина семени. По длине семени отмечается незначительная реакция исследуемых форм на условия года репродукции. В различных экологических условиях гидротермальный коэффициент (ГТК = 1,31 и 0,92) репродуцирования семян выявлено однонаправленное доминирование ширины семени. За большее выражение признака отвечают доминантные гены. Однако при недостаточном увлажнении отмечена тенденция к уменьшению на 0,73 размерности блока генов, детерминирующих ширину семени, по сравнению с таковым при высоком увлажнении, при этом наблюдается увеличение аддитивности генов. Показано, что широко используемый на практике приём калибровки семян по линейным размерам (для кабачка по ширине семени), в свете полученных данных требует уточнений в связи с экологическими условиями года их репродукции, особенностями генотипа и характера взаимодействия «генотип × среда».

Ключевые слова: семя, морфометрический признак, кабачок овощной, индекс среды, генетический анализ.

Ecologic and genetic analysis of morphometric features of seeds of *Cucurbita pepo* var. *giramontia* Duch.

V. F. Khlebnikov, N. V. Smurova,
Pridnestrovian State University n. a. T.G. Shevchenko,
128, St. 25 October, Tiraspol, Transnistria, 3300,
e-mail: v-khl@yandex.ru, natava.smurova@yandex.ru

Five parental forms of squash *Cucurbita pepo* var. *Giramontia* Duch. and 20 hybrids F_1 created in the research laboratory of Bioinformatics of SPSU, similar in precocity, but differing in the size of seeds are considered in the research. The variability of morphometric signs (weight, length, width and thickness of a seed) of seeds in a gradient of reproduction conditions

(7 years) was put in the limelight. To characterize the variability of seed bearers vegetation conditions, environment indexes calculated by “the mass of a seed” were used. The genetic analysis of variability and inheritance of signs was carried out with the use of the experimental material received according to the scheme of the complete diallelic crossing (5 x 5). The aim of the work was to research ecologic and genetic behavior of morphometric signs of a squash seed for the purposes of selection, seed-growing and technological tasks. Variability of morphometric signs of seeds in the research conducted in 2005–2012 showed, first of all, hydrothermal conditions of a reproduction year by rotation of crops on the sites of one field, genotypical factors, and interaction of the type “genotype-environment”. The regression analysis adequately revealed the role of genotype in the change of a slope angle. The most responsive to conditions of a reproduction year of characterizes were weight and width of a seed. The length of a seed only slightly reacts to the conditions of a reproduction year. In various environmental conditions (the hydrothermal coefficient = 1.31 and 0.92) of seeds reproductions was revealed the unidirectional dominance of such a characteristics as seed width. Dominant genes are responsible for a more considerable expression of the feature. However at poor humidification the tendency of decreasing by 0.73 of the genes block determining seed width dimensions, in comparison with the results in conditions of high humidification. At the same time increase in genes additivity was observed. It was shown that the widely used in practice sorting (calibration) of seeds according to the linear dimensions (as for squash, seed width calibration), requires specifications according to ecological conditions of their reproduction year, genotype specifics, and the character of interaction “genotype – environment”.

Keywords: seed, morphometric feature, squash, environmental index, genetic analysis.

Одним из фундаментальных свойств семян является свойство изменчивости [1]. Изменчивость семян является необходимым условием адаптивной стратегии организмов. У дикорастущих растений их изменчивость обычно выше, чем у культурных растений, а у перекрёстноопыляемых – выше, чем у самоопыляющихся видов. Изменчивость семян проявляется по морфологическим, физиологическим, генетическим и иным признакам. Характер проявления изменчивости зависит, в основном, от способа распространения, размера зародыша, структуры, текстуры и цвета семенных покровов, а также от формы и размера самого семени [2].

Изменчивость семян в культуре является фактором, усложняющим прецизионное осуществление основных технологических приёмов: посев, уход, уборка урожая и др. Поэтому в практике стремятся уменьшить изменчивость семян культурных растений и добиться их выравнивания по морфологическим и физиологическим свойствам. Однако у большинства видов сельскохозяйственных растений в той или иной степени она продолжает быть выраженной [3–4]. Вследствие этого предпосевное сортирование семян является обязательным элементом современных аграрных технологий.

Известно, что продуктивность растений тесно зависит от массы семян [5]. Однако сортировка семян по этому признаку не технологична. Поэтому в производстве широко используются способы отбора высококачественных семян путём сортирования с помощью решёт по линейным морфометрическим признакам [6]. Сегодня нет теории, которая обосновывает подходы к выделению фракций семян по этим признакам. Прямая или косвенная связь между морфометри-

ческими и агрономическими признаками семян имеет сложный характер и зависит от порядка взаимодействия между элементами, её составляющими [7].

Исходя из этих положений, задачей работы явилось изучение эколого-генетического поведения морфометрических признаков семени кабачка овощного для решения селекционных, семеноводческих и технологических задач.

Материалы и методы

Объектами исследования являлись 5 родительских форм кабачка овощного *Cucurbita pepo* var. *giramontia* Duch. и 20 гибридов F₁, созданных в НИЛ «Биоинформатика» ПГУ, близких по скороспелости (раннеспелые – 19/84, 48/20, 5Б; скороспелые – 166/5, 98/20), но различающихся по размеру семян.

Исследования проводили в 2005–2012 гг. на экспериментальном поле НИЛ «Биоинформатика» ПГУ им. Т. Г. Шевченко, расположенном в пойме р. Днестр. В настоящее время участок отделён от реки Днестр насыпной дамбой и представляет собой ровную поверхность. Почва участка – чернозём обыкновенный, среднemocный, тяжелосуглинистый.

Морфометрические признаки (масса, длина, ширина и толщина семени) определяли в выборке из 100 шт. семян каждого образца. Массу измеряли с помощью торсионных весов ВТ-500 с точностью до 0,001 г, а линейные размеры – с помощью микроскопа МБС-10 с точностью до 0,1 мм.

Индексы среды определяли по показателю «масса семени» по формуле Eberhart и Russel [8]:

$$I_y = [(\sum_y Y_{iy}/y) - (\sum_i \sum_y Y_{iy}/yn)],$$

где Y_{ij} – значение массы семени i -той родительской формы в j -том году; v – количество родительских форм; n – число лет исследований. По совокупности индексов характеризовали условия вегетации семенников: если $I_i = 0$, то условия благоприятные, если $I_i < 0$ – неблагоприятные.

Генетический анализ изменчивости и наследования признаков провели с использованием экспериментального материала, полученного по схеме полного диаллельного скрещивания (5×5) [8].

Результаты исследований

Морфологические признаки являются одним из основных показателей состояния семян. Их изменчивость в исследованиях, проведённых в 2005–2012 гг., определяет, в первую очередь, гидротермические условия года репродукции вследствие ротации посевов на участках одного поля, генотипические факторы и характер взаимодействия «генотип-среда».

Индексы среды (I_c), в которых выращивались исследуемые генотипы, изменялись от -27,69 до 13,48. Среди них 2005, 2006, 2010–2012 гг. были благоприятными для формирования семян ($I_c = 3,11-13,48$) а 2008–2009 гг. – неблагоприятными ($I_c = -27,69- -9,12$).

Угол наклона линий регрессии на рисунке отражает отзывчивость морфометрических признаков семян исследуемых форм на условия вегетации семенников. Роль генотипа на изменение угла наклона достаточно очевидна. Так, ширина семян форм 19/84, 98/5 незначительно зависит от условий года репродукции. Напротив, форма 166/5 характеризуется большой отзывчивостью ширины семени на условия репродукции.

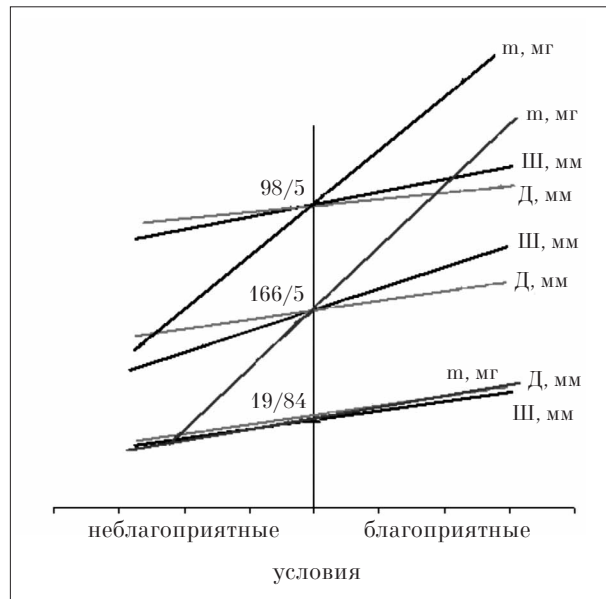


Рис. Линии регрессии морфометрических признаков семени на изменение условий репродукции

По длине семени отмечается незначительная реакция исследуемых форм на условия года репродукции.

Наиболее отзывчива на условия года репродукции масса семени форм 98/5 и 166/5.

Исключением является форма 19/84, у которой линии регрессии исследуемых морфометрических признаков семени совпадают. Это свидетельствует о высокой интегрированности признаков.

Таким образом, исследуемые генотипы по морфометрическим признакам дифференцируются различно в зависимости от условий вегетации. Результаты двухфакторного дисперсионного анализа позволили выявить существенные различия изменчивости исследуемых морфометрических признаков семян от генотипических и экологических факторов (табл. 1).

Таблица 1

Влияние факторов (%) на изменчивость морфометрических признаков семян кабачка

Признак	Исследуемые факторы	2005–2012 гг.	Условия вегетации	
			благоприятные	неблагоприятные
Длина	1	24,7	30,4	96,8
	2	23,8	22,6	0,0
	3	35,1	44,1	0,4
Ширина	1	11,0	7,0	94,3
	2	22,6	25,3	3,9
	3	57,4	57,0	0,2
Масса	1	13,9	28,5	3,4
	2	26,0	2,5	76,3
	3	53,5	60,6	16,9

Примечание: 1 – влияние генотипа; 2 – влияние среды; 3 – взаимодействие «генотип × среда».

Таблица 2

Изменение генетических параметров ширины семени кабачка

Показатели	Сущность	ГТК	
		1,31	0,92
D	Аддитивность действия генов	0,12	0,50
F	Направленность доминирования	0,14	0,54
H ₁	Положительные эффекты генов	0,57	0,71
H ₂	Отрицательные эффекты генов	0,39	0,11
h ₂	Алгебраическая сумма доминантных эффектов гетерозисных локусов	0,87	0,16
H ₁ /D	Средняя степень доминантности в каждом локусе	2,15	1,18
h ² /H ₂	Количество блоков доминантных генов контролирующих признак	2,23	1,50
E	Средовая вариация	0,08	0,14
H ²	Наследуемость в широком смысле слова	0,69	0,69
h ²	Наследуемость в узком смысле слова	0,32	0,63
r _[(V_r+W_r): x]	Коэффициент регрессии между средним значением признака у родителей и уровнем доминантности (W _r +V _r)	-0,78	-0,70

Установлено, что длина семени в неблагоприятных условиях определяется, в первую очередь, влиянием генотипа, а в благоприятных условиях наблюдается приблизительно равное влияние генотипа, среды и их взаимодействия. Ширина семени также в неблагоприятных условиях определяется генотипом, а в благоприятных – влияние генотипа резко снижено, но при этом значительно возрастает влияние взаимодействия генотипа и среды.

Масса семени в неблагоприятных условиях определяется действием факторов среды, а в благоприятных условиях – взаимодействием генотипа и среды.

Ранее было показано [9], что вариационные кривые морфометрических признаков семян у образцов, исходных для исследуемых форм, подчиняются закону нормального распределения. Корреляционные связи между ними изменяются от слабых до средних в зависимости от генотипа, что позволяет предположить возможность независимого их наследования [10].

Исходя из значимости признака «ширина семени» для решения технологических задач растениеводства генетический анализ был проведён по данным, полученным в различных экологических условиях (табл. 2).

Главным типом внутрислокусных взаимодействий, контролирующих ширину семени в условиях высокой увлажнённости, является сверхдоминирование ($\sqrt{H_1/D} > 1$).

В различных экологических условиях (гидротермический коэффициент = 1,31 и 0,92) репродуцирования семян выявлено однонаправленное доминирование. За большее

выражение признака отвечают доминантные гены. Однако при недостаточном увлажнении отмечена тенденция к уменьшению на 0,73 размерности блока генов, детерминирующих ширину семени, по сравнению с таковым при высоком увлажнении. При этом наблюдается увеличение аддитивности генов.

Следовательно, широко используемый на практике приём сортирования (калибровки) семян по линейным размерам (для кабачка по ширине семени) требует уточнений с учётом экологических условий года их репродукции, особенностей генотипа и характера взаимодействия «генотип × среда».

Литература

1. Яблоков А.В., Юсупов А.Г. Эволюционное учение. М.: Высш. шк., 2004. 309 с.
2. Левина Р.Е. Репродуктивная биология семенных растений. М.: Наука, 1981. 96 с.
3. Хлебников В.Ф. Информационные аспекты использования гетероспермии в растениеводстве // Вестник Приднестровского ГУ. 1997. № 1 (6). С. 83–90.
4. Телебокова Р.Н. Гетероспермия: явление, понятие, место среди прочих типов внутрислокусной изменчивости у четырех видов бобовых трибы Fabae. Москва: МПГУ: Прометей, 2013. 71 с.
5. Макрушина Е.М. Биологическое обоснование нового принципа отбора семян // Збірник наукових праць Інституту біоенергетичних культур І цукрових буряків. 2007. С. 129–136.
6. Корн А.М. Поиск новых технологий сортирования семян // Вестник РАСХН. 2008. № 2. С. 15–16.
7. Драгавцев В.А. О путях создания теории селекции и технологий эколого-генетического повышения

продуктивности и урожая растений // Факторы экспериментальной эволюции организмов: сборник научных статей. Киев: Логос, 2013. Т. 12. С. 38–41.

8. Кильчевский А.В., Хотылева Л.В. Экологическая селекция растений. Мн.: Техналогия, 1997. 372 с.

9. Хлебников В.Ф., Смурова Над.В., Смурова Нат.В. Исследование изменчивости морфометрических признаков семян кабачка // Вестник Приднестровского государственного университета. 2011. № 2 (38). С. 90–96.

10. Хлебников В.Ф., Смурова Нат.В., Смурова Над.В. Изменчивость и наследование линейных размеров семени кабачка // Современные тенденции в селекции и семеноводстве овощных культур. Традиции и перспективы. М.: Изд-во ВНИИССОК, 2010. Т. 1. С. 532–538.

References

1. Yablokov A.V., Yusupov A.G. Theory of evolution. M.: Vysshaya shkola, 2004. 309 p. (in Russian).

2. Levina R.E. Reproductive biology of seed plants. M.: Nauka, 1981. 96 p. (in Russian).

3. Khlebnikov V.F. Informational aspects of use of a heterospermy in crop production // Vestnik Pridnestrovskogo GU. 1997. № 1 (6). P. 83–90 (in Russian).

4. Telebokova R.N. Heterospermy: the phenomenon, the concept, the place among other types of intra popula-

tion variability of four types bean Fabae triba. M.: "MSPU" Prometej, 2013. 71 p. (in Russian).

5. Makrushina E.M. Biological justification of the new principle of seeds selection // Zbirnik naukovikh prats Institutu bioenergetichnikh kultur i zukrovikh buryakiv. Kyiv: IBCSB, 2007. P. 129–136 (in Russian).

6. Korn A.M. Searching of new technologies of sorting of seeds // Vestnik RASHN. 2008. № 2. P. 15–16 (in Russian).

7. Dragavtsev V.A. About paths of creation of the theory of selection and technologies of ecologic and genetic increase in efficiency and harvest of plants // Factory eksperimentalnoy evolutsii organismov: sbornik nauchnykh statey. Kyiv: Logos, 2013. Т. 12. P. 38–41 (in Russian).

8. Kilchevsky A.V., Hotyleva L.V. Ecological selection of plants. Minsk: Technalohija, 1997. 372 p. (in Russian).

9. Khlebnikov V.F., Smurova Nad.V., Smurova Nat.V. Research of variability of morphometric features of squash seeds // Vestnik Pridnestrovskogo GU. 2011. № 2 (38). P. 90–96 (in Russian).

10. Hlebnikov V.F., Smurova Nat.V., Smurova Nad.V. Variability and inheritance of size of Cucurbita pepo seeds / Sovremennye tendentsii v selktsii i semenovodstve ovoshchnikh kultur trends in vegetable breeding and seed production. Traditsii i perspektivy. M.: VNISSOK, 2010. Т. 1. P. 532–538 (in Russian).

Альтернативная энергетика: новые ресурсы биотоплива из растительного сырья

© 2017. Г. А. Булаткин, д. б. н., в. н. с.,
Г. В. Митенко, н. с., И. Д. Гурьев, инженер,
Институт фундаментальных проблем биологии РАН,
142290, Россия, Московская область, г. Пущино, ул. Институтская, 2,
e-mail: sadovod@rambler.ru

Для производства биотоплива второго поколения, наряду с отходами деревопереработки, перспективно сырьё, получаемое из травянистых растений, например, из мискантуса китайского (*Miscanthus sinensis* Anderss.) (Poaceae).

Исследования показали, что в среднем урожай надземной биомассы мискантуса за пять лет в варианте без удобрений составил 7,0 т/га сухого вещества (с колебаниями от 5,0 до 11,2 т/га), а при внесении удобрения – 12,1 т/га с колебаниями от 5,3 до 19,4 т/га в год. Мискантус является экологически эффективной полевой культурой. За пятилетний период в агроэкосистеме мискантуса содержание гумуса в верхнем 20-сантиметровом слое почвы увеличилось на 0,31%, в слое 20–40 см – на 0,26%. Энергетическая эффективность возделывания мискантуса (соотношение энергии, содержащейся в надземной биомассе с суммарными затратами технической энергии на возделывание и уборку урожая) в среднем за 5 лет исследований оказалась высокой и составила в варианте без удобрений около 11, а при внесении минеральных удобрений – около 12. Представленные экспериментальные данные показывают высокую агрономическую, энергетическую и экологическую эффективность возделывания мискантуса на серых лесных почвах южного Подмосковья и перспективность дальнейших подробных исследований в других регионах России.

Ключевые слова: биотопливо, альтернативная энергетика, серые лесные почвы, энергетическая эффективность, мискантус китайский (*Miscanthus sinensis* Anderss.), биопродуктивность.

Alternative power engineering: new resources vegetation materials

G. A. Bulatkin, G. V. Mitenko, I. D. Guriev,
Institute of Basic Biological Problems RAS,
2 Institutskaya St., Pushchino, Moscow region, Russia, 142290,
e-mail: sadovod@rambler.ru

Raw material used for production of second generation biofuel is received not only from wood processing oddments, but also from grass, such as *Miscanthus sinensis* Anderss., which is very useful in perspective.

The research resulted in the fact that the yield of *Miscanthus sinensis* Anderss. within five years in the experiment without any fertilizer was 7.0 t/hectare of solid stuff on the average (from 5.0 to 11.2 t/hectare), and in case of fertilizer introduction it was 12.1 t/hectare (from 5.3 to 19.4 t/hectare) per year. *Miscanthus sinensis* Anderss. is ecologically effective field culture and within five-years of this plant's presence in the agroecosystem the content of a humus in the soil significantly increased. On the average, during 5 years of research energy efficiency of cultivation of *Miscanthus sinensis* Anderss. in gray forest soils (a ratio of the energy contained in elevated biomass with the spent technical energy on cultivation and harvesting) was 11 in case without fertilizers, which is rather high, and about 12 in case of mineral fertilizers introduction. The experimental data show a high agronomic, energy, and ecological efficiency of *Miscanthus sinensis* Anderss. cultivation on gray forest soils of south near Moscow region, they also show that some further detailed research of the kind should be made in other regions in Russia.

Keywords: biofuel, alternative power engineering, gray forest soils, energy efficiency, *Miscanthus sinensis* Anderss., bioproductivity.

В настоящее время во многих странах делаются интенсивные попытки получения жидкого топлива из продукции растениеводства. В России основными источниками сырья для

получения биотоплива может рассматриваться побочная продукция растениеводства и деревопереработки, торф, в будущем – биомасса мискантуса, древесина энергетических лесов и т. д.

Следует отметить, что при производстве возобновляемой энергии должна ставиться задача получения дополнительной энергии (больше затраченной), т. е. энергии сверх суммы прямых и косвенных энергетических затрат на производство нового энергоносителя.

Однако производство альтернативной энергии с нулевым или отрицательным балансом возможно, если при её использовании достигается положительный **экологический эффект** в местах потребления «чистой» энергии.

Например, в России на долю автотранспорта приходится 90% общего объёма вредных веществ, поступающих от всех видов транспорта [1]. По величине выбросов автомобильного транспорта в нашей стране резко выделяется г. Москва – на её долю приходится более 800 тыс. т выбросов в год. Подсчитано, что за расчётное время эксплуатации, равное 6 годам, усреднённый автомобиль, работающий на углеводородном топливе, выбрасывает в атмосферу 9 т CO₂; 0,9 т CO; 0,25 т NO₂ и 80 кг углеводородов, не считая тяжёлые металлы, бенз(а)пирен, оксиды серы и другие поллютанты. Не менее 50% свинца в атмосфере на территории России связаны с выхлопами автомобилей. Загрязнение приземного слоя атмосферного воздуха в городах резко отрицательно влияет на здоровье людей, животных и жизнедеятельность растений, состояние зданий и сооружений и т. д. Замена чистого бензина на биотопливо в автотранспорте позволит существенно улучшить экологическую ситуацию в городах и промышленных агломерациях.

В настоящее время в Институте фундаментальных проблем биологии РАН разработаны методики оценки энергетической эффективности возделывания полевых культур, выявлены закономерности формирования затрат технической энергии на производство биомассы в цепи «поле – завод», показана нецелесообразность отчуждения органического вещества из агросферы и торфяных залежей в целях производства жидкого топлива в современной России [2]. Из трёх основных источников растительной биомассы главным резервом производства биотоплива второго поколения могут быть отходы деревопереработки, в результате использования которых, может быть произведено к 2020 г. около 954 млн ГДж технической энергии в виде биоэтанола. Даже при энергетической эффективности переработки древесной биомассы на уровне 30% суммарная прибавка энергии не превысит 1% топливно-энергетического баланса страны. В связи с

этим такие небольшие дополнительные величины энергии в форме экологически чистого топлива требуют рационального применения. Биотопливо необходимо применять внутри страны в качестве добавок к автомобильному бензину для улучшения атмосферы в крупных городах и промышленных агломерациях.

В России из хозяйственного оборота в последние два десятилетия выведено, по данным различных авторов, около 20–40 млн га пахотных земель, которые можно использовать для производства биоэнергии. Во многих регионах Нечерноземья и Сибири около 50% пашни практически не используется [3].

В мире появилось перспективное направление производства энергии из биомассы, получаемой при выращивании энергетических лесов, посевов трав. Для производства биотоплива второго поколения, наряду с остатками деревопереработки, перспективно сырьё, полученное из мискантуса китайского (*Miscanthus sinensis* Anderss.), который также называют «китайский камыш». Мискантус – род многолетних травянистых растений семейства мятликовых. Растения этого рода хорошо растут на различных типах почв, кроме песков и тяжёлых глин, прекрасно себя чувствуют на переувлажнённых участках, но могут расти и на относительно сухих местах. Предпочитают тёплый, влажный климат, но многие сорта и виды адаптировались к условиям средней полосы России. Размножаются мискантусы делением куста весной. Продуктивность его новых форм, выведенных в Институте цитологии и генетики СО РАН, составляет 10–15 т/га·год сухой биомассы [4]. Урожайность сухой биомассы мискантуса во Франции составляет 20 т/га [5]. Мискантус китайский можно бессменно на протяжении 15–20 лет культивировать на одном поле. Влияние мискантуса на гумусовый баланс в почве требует дополнительных подробных исследований в разных регионах страны.

Наиболее рациональный способ уборки заключается в транспортировке биомассы от поля до биоцеха без промежуточного хранения. Это означает необходимость размещать насаждения мискантуса в непосредственной близости к месту переработки.

Преимущество данного травянистого растения перед энергетическими лесами заключается, прежде всего, в том, что товарную продукцию получают уже со второго года после посадки. В дальнейшем уборка биомассы может производиться как через год, так и ежегодно. Для уборки биомассы не требуется

специализированной дорогостоящей техники, и скашивание может производиться обычными кукурузоуборочными комбайнами.

В случае необходимости, посадки мискантуса легко заменить на сельскохозяйственные культуры без существенного нарушения почвенного покрова, в отличие от энергетических лесов.

Мискантус образует плотную дернину. Это свойство растений является чрезвычайно полезным для борьбы с водной эрозией почвы на склоновых землях. Если принять, что с 1 га под посевом кукурузы в год смывается в среднем около 30 т почвы, то на воспроизводство только гумуса внесением органических удобрений необходимо вложить 1805 МДж/га невозобновимой энергии [6]. Возделывание мискантуса позволяет сократить эти непроизводительные затраты.

Посадка мискантуса, даже на части площади пашни России, не занятой сельскохозяйственными культурами, позволит получить большое количество растительной биомассы, сохранить и даже повысить содержание гумуса в почве, предотвратить зарастание пашни кустарником и редколесьем. Биомасса в начале эксплуатации насаждений может быть использована для производства топливных пеллет и брикетов, получения целлюлозы, а после строительства биоэлектростанций – и для производства жидкого биотоплива.

Цель работы – изучение круговорота химических элементов и потоков энергии в агроэкосистеме новой культуры для зоны серых лесных почв – мискантуса китайского (*Miscanthus sinensis* Anderss.). В настоящей публикации обсуждается вопрос биопродуктивности, энергетической и экологической эффективности исследуемой культуры.

Объекты и методы исследования

На серых лесных почвах заложен микрополевым опытом с мискантусом китайским. Экспериментальный участок расположен в южном Подмосковье со следующими координатами 54°49 с. ш. и 37°35 в. д. Предусмотрены два варианта: 1. Контроль (без удобрений); 2. Внесение минеральных удобрений в дозе $N_{120}P_{100}K_{100}$ при закладке опыта и повторно через 3 года. Площадь делянки 10 м², повторность 4-х кратная. Закладка плантации произведена весной 7 мая 2012 г. методом посадки делённых корневищ. Расстояние между рядами – 60 см, между растениями – 20 см. В течение вегетации определяли температуру на поверхности по-

чвы, на глубинах 5, 10, 15, 20 и 40 см, влажность почвы по горизонтам 0–20, 20–40 см, отмечали наступление фенологических фаз. Уборка урожая надземной массы проводилась осенью, перед наступлением первых морозов. Биомассу с делянки взвешивали на технических весах, в средних пробах определяли влажность. Пробы растений с каждого варианта растений разбирали на зелёные листья, сухие листья, стебли и метёлки. После высушивания определяли соотношение сухой биомассы частей растений. Статистическая обработка результатов учёта урожая осуществлялась согласно методике [7] с использованием MSExcel 2010. Затраты технической энергии рассчитывали в соответствии с методикой [8].

Ежегодные затраты энергии на уход за производственной плантацией и уборку составляют небольшую величину: это внесение минеральных удобрений и раннее весеннее боронование, а также скашивание надземной биомассы с помощью кукурузоуборочного комбайна.

В сумме затраты на удобренном варианте на 1 год эксплуатации посадок оцениваются в 19310 МДж/га прямых и косвенных вложений технической энергии (энергия, содержащаяся в топливе, амортизация сельскохозяйственных машин, трудовые затраты и т. д.) с учётом амортизации энергозатрат на закладку плантации.

Результаты и их обсуждение

Исследования показали, что в среднем за пять лет урожай надземной биомассы мискантуса в варианте без удобрений составил 7,0 т/га сухого вещества с колебаниями от 5,0 до 11,2 т/га, а при внесении удобрений – 12,1 т/га с колебаниями от 5,3 до 19,4 т/га в год (табл. 1).

Для корректного анализа потоков антропогенной энергии в агроэкосистемах энергозатраты на производство урожая культурных растений должны включать две статьи: на выращивание культуры и на воспроизводство параметров агрономически значимых свойств и режимов почв до уровня, предшествующего возделыванию культуры.

Эти две величины в сумме составляют *совокупные затраты* антропогенной энергии в данной агроэкосистеме [6]. На посадках мискантуса затраты на восстановление почвенного плодородия связаны только с нейтрализацией почвенной кислотности, вызванной внесением физиологически кислых минеральных удобрений.

Таблица 1

Урожай надземной биомассы мискантуса китайского на серых лесных почвах, т/га абс. сух. вещества

Вариант	Годы					Среднее за 5 лет
	2012	2013	2014	2015	2016	
Контроль (без удобрений)	5,0	11,2	7,6	6,0	5,2	7,0
$N_{120}P_{100}K_{100}$ (при закладке и в 2015 г.)	5,3	17,7	8,1	10,0	19,4	12,1
$НСР_{05}$	0,5	1,1	0,7	0,8	2,0	–

Таблица 2

Энергетическая эффективность возделывания мискантуса китайского на серых лесных почвах

Вариант	Годы					Среднее за 5 лет
	2012	2013	2014	2015	2016	
Контроль (без удобрений)	9,2	25,0	11,9	9,5	8,3	10,9
$N_{120}P_{100}K_{100}$ (при закладке и в 2015 г.)	6,3	23,9	8,7	9,4	20,4	11,9

Мискантус является экологически эффективной полевой культурой. Наши исследования показали, что за пятилетний период в агроэкосистеме мискантуса содержание гумуса в почве существенно увеличилось. В варианте без удобрений (контроль) содержание гумуса в слое почвы 0–20 см повысилось с 1,74 в 2012 г. до 2,05% в слое 20–40 см – с 1,20 до 1,46%. Это произошло за счёт большого поступления в почву органического вещества ввиду отпада корней, масса которых в 1,5 раза больше, чем у кукурузы [9]. На удобренном варианте увеличения практически не произошло (содержание гумуса в 2016 г. в верхнем 20 см слое почвы составило 1,85%, в слое 20–40 см – 1,29%). Стабилизация содержания гумуса в почве удобренного варианта связана в основном с отрицательным влиянием интенсивного внесения минеральных удобрений на гумусовый пул серой лесной почвы. По-видимому, происходила дополнительная минерализация органического вещества почвы под действием азотного удобрения [10].

В многолетнем эксперименте был также изучен в сравнительном аспекте температурный режим почвы под мискантусом китайским и яровой пшеницей. Исследования показали, что в вегетационные периоды в агроэкосистеме мискантуса существенно снижается температура почвы как на поверхности, так и на глубинах 5 и 20 см [11].

Расчёты показали высокую энергетическую эффективность выращивания мискантуса на серых лесных почвах. Как видно из данных таблицы 2, в среднем за 5 лет соот-

ношение содержания энергии в уборной наземной биомассе растений мискантуса и затратами технической энергии на выращивание и уборку составило 10,9 и 11,9. Таким образом, на каждый МДж затраченной технической энергии получено около 11–12 МДж энергии в биомассе.

Заключение

Представленные данные показывают высокую агрономическую, энергетическую и экологическую эффективность возделывания мискантуса на серых лесных почвах и перспективность дальнейших подробных исследований этой культуры в различных регионах России.

Предварительно требуется разработка и апробирование технологий возделывания мискантуса в разнообразных почвенно-климатических зонах страны, а также разработка системы удобрений и оценки энергетической эффективности его производства.

Следующим шагом является районирование территории России с учётом биоклиматического потенциала для энергетически эффективного возделывания мискантуса.

Литература

1. Природные ресурсы и экология России. Федеральный атлас. Изд. 2-е / Под ред. Н.Г. Рыбальского и В.В. Снакина. М.: НИА-Природа, 2003. 148 с.
2. Bulatkin G.A. Producing second-generation biofuel from plant materials // Herald of the Russian Academy of Sciences. 2010. V. 80. № 3. P. 294–298.

3. Национальный атлас почв Российской Федерации / Под ред. С.А. Шобы. М.: Факультет почвоведения МГУ им. М.В. Ломоносова. Изд-во «АСТРЕЛЬ». 2011. 632 с.

4. Шумный В.К., Вепрев С.Г., Нечипоренко Н.Н., Горячковская Т.Н., Слынько Н.М., Колчанов Н.А., Пелтек С.Е. Новая форма мискантуса китайского (веерника китайского *Miscanthus sinensis* Anderss.) как перспективный источник целлюлозосодержащего сырья // Вестник Вавиловского общества генетиков и селекционеров. 2010. Т. 14. №1. С. 122–126.

5. Ракитова О. Французы гранулируют мискантус // Thebioenergy international. 2007. № 4. С. 25.

6. Булаткин Г.А. Эколого-энергетические основы повышения продуктивности агроэкосистем. М.: НИИ-Природа, 2008. 366 с.

7. Доспехов Б.А. Методика полевого опыта. М., Агропромиздат. 1985. 351 с.

8. Булаткин Г.А. Энергетическая эффективность применения удобрений в агроценозах. Методические указания. Пушкино: ОНТИ НЦБИ АН СССР. 1983. 46 с.

9. Schneckenberger K., Kuzyakov Ya. Carbon sequestration under *Miscanthus* in sandy and loamy soils estimated by natural ¹³C abundance // Journal of Plant Nutrition and Soil Science. 2007. № 4. P. 538–542.

10. Кудеяров В.Н. Цикл азота и эффективность удобрений. М.: Наука. 1989. 216 с.

11. Bulatkin G.A., Guriev I.D. Efficiency of cultivation of chinese silver grass (*Miscanthus sinensis* Anderss.) on gray forest soils of southern Moscow region territory, Russia // Italian Science Review. 2016. V. 1 (34). P. 151–155.

References

1. Natural resources and environment of Russia. Federal atlas. M.: NIA-Priroda. 2003. 148 p. (in Russian).

2. Bulatkin G.A. Producing second-generation biofuel from plant materials // Herald of the Russian Academy of Sciences. 2010. V. 80. № 3. P. 294–298 (in Russian).

3. National atlas of soils of the Russian Federation / Pod red. S.A. Shoby. M.: Facultet Pochvovedeniya MGU im. M.V. Lomonosova. M.: ASTREL. 2011. 632 p. (in Russian).

4. Shumny V.K., Veprev S.G., Nechiporenko N.N., Goryachkovskaya T.N., Slunko N.M., Kolchanov N.A., Peltek S.E. A new variety of *Miscanthus sinensis* Anderss. is a promising source of cellulosic material // Vestnik VOGiS. 2010. V. 14. № 1. P. 122–126 (in Russian).

5. Rakitova O. The French pelletize miscanthus // The bioenergy international. № 4. 2007. P. 25 (in Russian).

6. Bulatkin G.A. Ecological-energy basis of optimization of agroecosystems productivity. M.: NIA-Priroda. 2008. 366 p. (in Russian).

7. Dospekhov B. A. Experimental technique in field experiments. M.: Agropromizdat. 1985. 351 p. (in Russian).

8. Bulatkin G.A. Energy efficiency of fertilizers use in agroecosystems. Pushchino ONTI NtsBI AN SSSR. 1983. 46 p. (in Russian).

9. Schneckenberger K., Kuzyakov Ya. Carbon sequestration under *Miscanthus* in sandy and loamy soils estimated by natural ¹³C abundance // Journal of Plant Nutrition and Soil Science. 2007. № 4. P. 538–542.

10. Kudeyarov V.N. Nitrogen cycle and fertilizer efficiency. M.: Nauka. 1989. 216 p. (in Russian).

11. Bulatkin G.A., Guriev I.D. Efficiency of cultivation of chinese silver grass (*Miscanthus sinensis* Anderss.) on gray forest soils of southern Moscow region territory, Russia // Italian Science Review. 2016. V. 1 (34). P. 151–155 (in Italian).

Оценка токсичности регулятора роста растений на почвенных беспозвоночных *Eisenia fetida* и гидробионтов *Daphnia magna*

© 2017. О. В. Зайцева¹, магистрант,
С. М. Севостьянов², к. б. н., зав. лаб.,
Д. В. Дёмин², к. б. н., с. н. с.,

¹ Пущинский государственный естественно-научный институт,
142290, Россия, Московская обл., г. Пущино, проспект Науки, 3,

² Институт фундаментальных проблем биологии РАН,
142290, Россия, Московская обл., г. Пущино, ул. Институтская, 2,
e-mail: lutralutra1992@mail.ru, Sevost2000@rambler.ru, nimedd@yandex.ru

Представлены результаты тестирования стимулятора роста растений Natural plant growth regulator (Biochemical Pesticide) на живых тест-объектах: почвенных беспозвоночных – червях *Eisenia fetida* Savigny и гидробионтах – *Daphnia magna* Straus. Препараты для стимуляции роста представляют собой сухой экстракт, полученный выделением физиологически активной фракции при ультра-фильтрационном разделении водорастворимых компонентов клеточного сока растительного сырья картофеля *Solanum tuberosum*. Препарат предназначен для предпосевной обработки семян и растений во время вегетационного периода. Для оценки безопасности препаратов для экосистем была проведена оценка его воздействия на живые организмы с целью определения безопасных концентраций. Показано, что для тест-объектов действующие концентрации значительно отличаются, при этом они значительно выше концентраций, рекомендуемых к использованию для обработки растений. Концентрация 10 мг/л оказалась безопасной для живых организмов (за исключением фильтрата для дафний в хроническом опыте).

Ключевые слова: биотестирование, стимулятор роста, *Eisenia fetida*, *Daphnia magna*, острая токсичность, субхроническая токсичность.

Evaluation of the toxicity of plant growth regulator on soil invertebrates *Eisenia fetida* and aquatic *Daphnia magna*

O. V. Zaytseva¹, S. M. Sevostyanov², D. V. Demin²,

¹ Pushchino State Institute of Natural Sciences,

3 Prospect of Science, Pushchino, Moscow region, Russia, 142290,

² Institute of Basic Biological Problems Russian Academy of Sciences,

2 Institutskaya St., Pushchino, Moscow region, Russia, 142290,

e-mail: lutralutra1992@mail.ru, Sevost2000@rambler.ru, nimedd@yandex.ru

The production of environmentally friendly products is one of the promising directions in agriculture. Using of biological growth stimulants is an important direction that allows spurring the growth and cultivation of plants at various stages of development without big expenses on chemical products and promoting one-time shoots, reducing the probability of damage by pests, especially at the early stages of ontogeny. The assessment of safety of biological plant growth stimulants for the environment is one of the important points in the study of them. In our article natural plant growth regulator (Biochemical Pesticide) test results are shown on the living test objects, such as invertebrate earthworms *Eisenia fetida* Savigny and hydrobionts *Daphnia magna* Straus. Samples of the plant growth regulator are presented in the form of a dry extract that was obtained by separation of physiologically active fraction of potato plant (*Solanum tuberosum*) cells via ultrafiltration. It was designed for plant leaves treatment and seeds preparation prior to planting. It was tested for ecosystem safety compliance by exposure to living organisms in order to estimate a safe concentration. It was shown that concentrations used for a test objects were significantly higher than the ones recommended for plants treatment. Content 10⁻³ proved safe for living organisms (except filtrate for *Daphnia* in chronic experiment). Concentration offered for use is 10⁻³–10⁻⁹%. In addition, it was found that after dilution of the preparation of the dry extract, over time, it quickly loses its properties, i. e. it is not persistent, so when in use it will not have any negative impact on the environment.

Keywords: biological testing, augmenter, *Eisenia fetida*, *Daphnia magna*, acute toxicity, sub-chronic toxicity.

Стремление добиться увеличения объёма и качества урожая побуждает исследователей искать пути к повышению эффективности агротехнологий. В последние десятилетия интенсивно ведутся работы по поиску физиологически активных веществ, обладающих ростостимулирующей активностью. К числу приёмов, направленных на повышение энергии прорастания и всхожести семян, можно отнести их предпосевную обработку методом замачивания в растворах сверхмалых концентраций регуляторов роста растений [1].

Важным фактором для применения стимуляторов роста является их безопасность для почвенных организмов и обитателей поверхностных вод.

Одним из таких перспективных препаратов является стимулятор роста растений «Рафитур» (РФУ) [1], который представляет собой сухой растительный экстракт после ультрафильтрационной сепарации и лиофильной сушки продуктов водной экстракции в процессе механохимической активации растительного сырья (проростки *Solanum tuberosum*).

Целью нашего исследования являлась оценка воздействия данного препарата и его фракций на живые организмы для оценки безопасности их применения.

Объекты и методы

Препарат «Рафитур» представляет собой сухой растительный экстракт после ультрафильтрационной сепарации ($\Delta P = 0,2$ атм.) и лиофильной сушки продуктов водной экстракции в процессе механохимической активации растительного сырья (проростки *Solanum tuberosum*) методом истирания и экструзии. В ходе подбора оптимальных параметров ультрафильтрационного фракционирования компонентов растительного экстракта были выделены три варианта препарата:

1) РФУ – концентрат (ретант, полученный на полуволоконном модуле Faserkraft УФ-3-30-ПС с номинально отсекаемой молекулярной массой 30 кДа) (препарат 1);

2) РФУ – фильтрат (пермеат, полученный на полуволоконном модуле Faserkraft УФ-3-30-ПС с номинально отсекаемой молекулярной массой 30 кДа) (препарат 2);

3) Рафитур М001 – фильтрат (пермеат, полученный на полуволоконном модуле Faserkraft УФ-3-1-ПВХ с номинально отсекаемой молекулярной массой 1 кДа) (препарат 3).

Общий состав стимулятора роста растений: белок, моно- и дисахариды (фруктоза,

глюкоза, сахароза, мальтоза), свободные аминокислоты (гидроксипролин, аспарагиновая кислота, глутаминовая кислота, пролин, валин, метионин, изолейцин, лейцин, тирозин), микро- и макроэлементы (калий, натрий, кальций, магний, фосфор, железо, марганец, цинк), оксикарбоновые кислоты (лимонная, яблочная).

В качестве тест-объектов в исследовании были использованы почвенные беспозвоночные – дождевые черви *Eisenia fetida*, водные беспозвоночные – ракообразные-фильтраторы дафнии *Daphnia magna*.

Тестирование острой токсичности препарата для дождевых червей проводили по модификации методики международного стандарта ИСО 11268 [2]. Контролем служил субстрат следующего состава: 80 г суглинок, 20 г каолинит, 350 г песок, 50 г торф по сухому весу. РФУ в субстрат вносили в виде растворов, обеспечивающих концентрацию 0,1; 0,5 г/кг. Количество и массу червей определяли на 7 и 14 сутки эксперимента.

Культура *Daphnia magna* получена в НИЦ «Токсикологии и гигиенической регламентации биопрепаратов» в 1999 г., и культивируется в лабораторных условиях в лаборатории функциональной экологии Института фундаментальных проблем биологии РАН (г. Пущино) для биотестирования [3]. Для тестирования токсичности в сосуды наливали по 100 мл контрольной или тестируемой воды. В каждый сосуд помещали по 10 односуточных дафний и экспонировали при оптимальных условиях в течение 96 часов. Повторность трёхкратная. При кратковременном биотестировании дафний не кормили, учёт выживаемости проводили через 1, 6, 24, 48, 72 и 96 часов. Если в любой учитываемый период времени гибло 50 и более процентов дафний, биотестирование прекращали. рН растворов в начале эксперимента составляло РФУ-ретант 1000 мг/кг – 6,84; РФУ-пермиант 1000 мг/кг – 6,89 (препараты 1 и 2 соответственно).

Оценка субхронической токсичности на дафниях проводилась следующим образом: объём пробы воды или водной вытяжки для биотестирования без разбавления составлял 1 литр. Далее в сосуды наливали по 300 мл контрольной и тестируемой водной вытяжки. Повторность трёхкратная. В каждый сосуд вносили одинаковое количество корма, помещали по 10 дафний (самок). Дафний кормили ежесуточно. Три раза в неделю в сосудах с дафниями проводили смену контрольного и тестируемого раствора на свежеприготов-

ленные. При смене воды дафний кормили за 3 часа до смены. С момента появления молоди в те сутки, когда меняли воду, производили учёт выживших исходных самок и выметанной молоди. Для этого самок с помощью стеклянной трубки пересаживали в заранее подготовленные сосуды с контрольной и тестируемой водой и подсчитывали их количество в каждом сосуде. Оставшуюся воду процеживали через сито из мельничного газа. При этом на сите оставалась выметанная молодь, которую подсчитывали и удаляли [3, 4]. Учёт показателей жизнедеятельности дафний производили на 3, 7, 15 и 23 сутки эксперимента.

Результаты и их обсуждение

Тестирование острой токсичности препарата для дождевых червей показало, что препараты 1 и 3 являются безопасными в концентрациях 0,1 г/кг (достоверного отличия с контролем по U-критерию Манна-Уитни нет). Препараты 1 и 2 не оказывают негативного эффекта при их содержании в количестве 0,5 г/кг (табл. 1 и 2).

Оценка острой и субхронической токсичности препарата для дафний показала, что при концентрации 10 мг/л в остром опыте выживаемость дафний составила 100%. При более высоких концентрациях появляется разброс данных. Для препаратов 1 и 2 при 50 мг/л и 100 мг/л в растворах фиксируется 100% гибель через 72 часа, кроме раствора фильтрата с концентрацией 100 мг/л, где

гибель зафиксирована через 48 часов. При концентрации 500 мг/л обоих препаратов 100% гибель наступает в течение 6 часов. Для препарата 3 при концентрации 50 мг/л наблюдалась гибель всех тест-объектов через 96 часов, при 100 мг/л и 500 мг/л – через 48 часов. Следовательно, препарат 3 был менее токсичен, чем 1 и 2 (табл. 3).

В хроническом опыте с дафниями определено, что растворы фильтрата и концентрата в концентрациях 10 мг/л приводят к увеличению гибели взрослых дафний по сравнению с контролем. Достоверное отличие (то есть наличие токсического действия среды на дафнии [4]) наблюдается только в варианте с использованием фильтрата в концентрации 10 мг/л. При этой же концентрации получена максимальная плодовитость, она была выше, чем в контроле и при концентрации 1 мг/л (табл. 4). При этом в концентрации 1 мг/л (массовая доля 10^{-6}) выживаемость взрослых дафний была равной контролю. Объяснением такого результата могут быть свойства растворов, а именно, их нестойкость во времени. После перемещения дафний в свежий раствор (по методике каждые трое суток) они испытывают максимальное воздействие, что приводит со временем к гибели наименее устойчивых особей. Далее происходит потеря активности растворов, учитывая малые концентрации и внесение корма. Так как данные растворы не оказывают негативного воздействия на почвенные микроорганизмы, логично предположить, что они не оказывают выраженного

Таблица 1
Острая летальная токсичность для червей стимулятора роста растений «Рафитур» (РФУ) и его фракций

Сутки	Вариант						
	Контроль	РФУ-к			РФУ-ф		
		0,1 г/кг	0,5 г/кг	1 г/кг	0,1 г/кг	0,5 г/кг	1 г/кг
7	10	10	8,67±2,31	0	10	0	0
14	10	10	8,67±2,31	0	10	0	0

Примечание: РФУ-к – РФУ-концентрат, РФУ-ф – РФУ-фильтрат.

Таблица 2
Изменение массы червей под действием стимулятора роста растений «Рафитур» (РФУ)

Сутки	Вариант						
	Контроль	РФУ-к			РФУ-ф		
		0,1 г/кг	0,5 г/кг	1 г/кг	0,1 г/кг	0,5 г/кг	1 г/кг
0	5,97±0,31	5,53±0,31	5,65±0,11	5,97±0,21	5,62±0,05	5,57±0,24	5,98±0,50
7	5,90±0,26	5,63±0,25	4,50±1,76	0,00	5,66±0,23	0,00	0,00
14	5,91±0,37	5,53±0,27	4,40±1,78	0,00	5,44±0,08	0,00	0,00

Примечание: РФУ-к – РФУ-концентрат, РФУ-ф – РФУ-фильтрат.

Таблица 3

Выживаемость *Daphnia magna* в остром эксперименте в ряду разведений препарата «Рафитур» (РФУ) и его фракций

Концентрация	Препарат	Время экспозиции, часы					
		1 ч	6 ч	24 ч	48 ч	72 ч	96 ч
Контроль	вода	10	10	10	10	10	9,3±0,6
	вода	10	10	10	10	10	10
	вода	10	10	10	10	10	10
10 мг/л	РФУ-к	10	10	10	10	10	10
	РФУ-ф	10	10	10	10	10	10
	Рафитур М001-ф	10	10	10	10	10	10
50 мг/л	РФУ-к	10	9,0±1,7	7,7±3,2	1,7±1,2	0	0
	РФУ-ф	10	10	8,3±1,5	3,0±2,7	0	0
	Рафитур М001-ф	10	10	10	5,3±1,2	3,0±2,0	0
100 мг/л	РФУ-к	10	9,7±0,6	6,0±1,0	0,3±0,6	0	0
	РФУ-ф	10	8,7±1,5	6,3±4,6	0	0	0
	Рафитур М001-ф	10	8,3±1,2	8,3±1,2	0	0	0
500 мг/л	РФУ-к	0	0	0	0	0	0
	РФУ-ф	0	0	0	0	0	0
	Рафитур М001-ф	10	9,3±0,6	1,3±0,6	0	0	0

Примечание: РФУ-к – РФУ-концентрат, РФУ-ф – РФУ-фильтрат.

Таблица 4

Показатель плодовитости дафний в субхроническом опыте с препаратом «Рафитур» (РФУ) и его фракциями

Сутки	Контроль	РФУ-к		РФУ-ф	
		10 мг/л	1 мг/л	10 мг/л	1 мг/л
3	0,04±0,04	0,04±0,04	0,07±0,04	0,08±0,08	0,03±0,03
7	0,94±0,31	0,31±0,19	0,46±0,24	0,66±0,36	0,50±0,14
15	1,10±0,62	1,96±0,30	0,91±0,18	5,03±3,65	0,97±0,28
23	1,07±0,24	1,36±0,75	0,60±0,08	2,51±1,28	0,7±0,24

Примечание: РФУ-к – РФУ-концентрат, РФУ-ф – РФУ-фильтрат.

негативного влияния на микроводоросли, используемые для корма. Таким образом, в условиях регулярного обновления растворов на свежеприготовленные, при концентрации 10 мг/л, происходит гибель наиболее чувствительных особей.

Действие препаратов на тест-объекты проявляются по разному, общей безопасной концентрации нами не обнаружено: для червей – от 100 мг/кг (10^{-4}), для дафний – абсолютно безопасна концентрация 10 мг/л (10^{-5}).

Таким образом, предлагаемые для использования препараты концентрации 10^{-3} – 10^{-9} % [1] значительно меньше концентраций, оказавших негативное воздействие на тест-объекты в опытах.

После разведения препараты со временем теряют свои свойства, то есть не являются стойкими, поэтому исследуемые препараты, при их использовании, не могут оказывать негативного воздействия на окружающую среду в рекомендуемых концентрациях.

В заключении следует отметить, что методы биотестирования сами по себе не раскрывают причин токсичности и не заменяют аналитического контроля химического состава исследуемых объектов, а лишь дополняют его, позволяя прогнозировать воздействие объектов на биоту [6]. Другим важным моментом проведённых исследований является сопоставимость результатов аналогичных методик биотестирования, выполненных в различных лабораториях [7]. Результаты биотестирования с использованием живых организмов являются общепринятым в мировой практике критерием оценки безопасности регуляторов роста растений.

Литература

1. Багнавец Н.Л., Белопухов С.Л., Филиппова А.В. Применение биопрепарата РФУ для предпосевной обработки риса // Известия Оренбургского государственного аграрного университета. 2015. № 4 (54). С. 41–43.

2. Фомин Г.С., Фомин А.Г. Определение загрязнения по острой летальной токсичности у земляных червей (ИСО 11268) / Почва. Контроль качества и экологической безопасности по международным стандартам: Справочник. М.: Издательство «Протектор», 2001. 304 с.

3. Методика биотестирования загрязнителей почвы. НИЦ ТБП, 1996. 10 с.

4. Москалёв А.А., Новаковский А.Б. Статистические методы в экологии с использованием R, Statistica, Excel и SPSS: учебное пособие. Сыктывкар: Изд-во СыктГУ, 2014. 197 с.

5. Брагинский Л.П. Методологические аспекты токсикологического биотестирования на *Daphnia magna* Str. и других ветвистоусых ракообразных (критический обзор) // Гидробиологический журнал. 2000. Т. 36. № 5. С. 50–70.

6. Селивановская С.Ю., Латыпова В.З. Обоснование системы экспериментальной оценки класса токсичности осадков сточных вод и выбора способов их утилизации // Экологическая химия. 2001. Т. 10. Вып. 2. С. 124–134.

7. Бронуицкая Е.А., Петраш В.В., Ашихмина Т.Я., Кондакова Л.В. Сопоставительная оценка токсичности поверхностных вод и почвы по результатам биотестирования двумя независимыми лабораториями // Теоретическая и прикладная экология. 2015. № 4. С. 59–63.

References

1. Bagnavets N.L., Belopukhov S.L., Filippova A.V. Application of the vegetative phyto-regulator of yields

in pre-sowing rice treatment // Izvestia Orenburgskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta. 2015. № 4 (54). P. 41–43 (in Russian).

2. Fomin G.S., Fomin A.G. Identification of pollution by acute lethal toxicity of earthworms (ISO 11268) / Soil. Control of quality and environmental safety by international standards. Spravochnik. M.: "Protector", 2001. 304 p. (in Russian).

3. Methods of biological testing of soil pollutants. NITS TBP, 1996. 10 p. (in Russian).

4. Moskalev A.A., Nowakowski A.B. Statistical methods in ecology with using R, Statistica, Excel and SPSS: a tutorial. Syktyvkar: Izd-vo SyktGU, 2014. 197 p. (in Russian).

5. Braginsky L.P. Methodological aspects of toxicology bioassay on *Daphnia magna* Str. and other cladocerans (critical review) // Gidrobiol. Zhurn. 2000. T. 36. № 5. P. 50–70 (in Russian).

6. Selivanovskaya S.Y., Latypova V.Z. Justification of system experimental evaluation toxicity class of sewage sludge and the choice of methods for their disposal // Ecologicheskaya khimiya. 2001. T. 10. Vyp. 2. P. 124–134 (in Russian).

7. Bronovitskaya E.A., Petrash V.V., Ashikhmina T.Ya., Kondakova L.V. Comparative evaluation of toxicity of surface water and soil according to the results of biotesting by two independent laboratories // Theoretical and Applied Ecology. 2015. № 4. P. 59–63 (in Russian).

Биосорбция Pb(II), Zn(II) и Cu(II) из водных растворов мицелием *Trametes versicolor*

© 2017. А. А. Широких^{1,2}, д. б. н., профессор, в. н. с.,
Д. В. Попыванов¹, аспирант,
И. Г. Широких^{1,2,3} д. б. н., профессор, зав. лабораторией,

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

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

³Зональный научно-исследовательский институт сельского хозяйства
Северо-Востока имени Н. В. Рудницкого,
610007, Россия, г. Киров, ул. Ленина, 166 а,
e-mail: aleshirokikh@eandex.ru

В работе изучали способность к биосорбции тяжёлых металлов (ТМ) вызывающего белую гниль древесины гриба *Trametes versicolor*, который в настоящее время все шире используется в производстве разнообразных лекарственных препаратов и БАДов. Чтобы минимизировать затраты, отходы грибной биомассы фармацевтической промышленности предлагается использовать в процессах биоремедиации промышленных стоков. В модельном эксперименте проведено количественное определение биосорбции мицелием *T. versicolor* Cu(II), Zn(II) и Pb(II). Рост гриба в погружённой качалочной культуре происходил в форме мицелиальных агрегатов (пеллет), которые, благодаря хорошим механическим свойствам, обеспечивают грибу технологическое преимущество при сепарации. Накопление мицелиальной биомассы было существенно ниже по сравнению с контролем, в присутствии 40–200 мг/л Pb²⁺; 40 мг/л Cu²⁺ и 50 мг/л Zn²⁺. Сорбционная способность *T. versicolor* изменялась также в зависимости от природы металла. Показано, что *T. versicolor* наиболее эффективен в удалении из водных растворов Pb(II), максимальная биосорбция для которого составила 21 мг/г сухой биомассы. Степень извлечения из растворов для Zn(II) и Cu(II) составила 14 и 10% соответственно. Зависимости между количеством сорбированных грибом ионов металлов и величиной накопления мицелиальной биомассы не выявлено. В качестве общей тенденции установлено, что в исследованном диапазоне концентраций эффективность удаления грибом *T. versicolor* металлов возрастала с увеличением их исходного содержания в растворе. Полученные результаты представляют интерес для совершенствования или развития новых биотехнологических процессов, основанных на применении грибного мицелия для селективного удаления металлов из промышленных и бытовых стоков.

Ключевые слова: сточные воды, тяжёлые металлы, биоремедиация, *Trametes versicolor*, погружённая культура, биомасса мицелия, сорбция, пеллеты.

Biosorption of Pb(II), Zn(II) and Cu(II) from aqueous solutions by *Trametes versicolor* mycelium

A. A. Shirokikh^{1,2}, D. V. Popivanov¹, I. G. Shirokikh^{1,2,3},
¹Vyatka State University,

36 Moskovskaya St., Kirov, Russia, 610000,

²Institute of Biology of the Komi Science Centre of the Ural Division RAS,
28 Kommunisticheskaya St., Syktyvkar, Russia, 167982,

³N.V. Rudnitski Zonal North-East Agricultural Research Institute,
166a Lenina St., Kirov, Russia, 610007,
e-mail: aleshirokikh@eandex.ru

White-rot fungi *Trametes versicolor* is currently increasingly used in the manufacture of various medicines and dietary supplements. To minimize costs, we propose to use waste fungal biomass of the pharmaceutical industry in the processes of bioremediation of industrial effluents. In this study, heavy metal biosorption potentials of *T. versicolor* were determined. Biosorption studies were performed for Cu(II), Zn(II) and Pb(II) at the same operational conditions and the effectiveness of fungi at removing these heavy metals was compared. It was found that *T. versicolor* were the most effec-

tive in removing Pb(II) from aqueous solutions with maximum biosorption capacities of 23 mg Pb(II)/g of dry biomass. With *T. versicolor*, the adsorptive capacity order was determined to be Pb(II) > Zn(II) > Cu(II). As a general trend, metal removal efficiency with these fungi increased as the initial metal ion concentration increased. The obtained results are of interest for improvement or development of new biotechnological processes based on the use of fungal mycelium for the selective removal of metals from industrial and domestic wastewater.

Keywords: waste water, heavy metals, bioremediation, *Trametes versicolor*, submerged culture, biomass of mycelium, sorption, pellets.

Извлечение металлов из промышленных и бытовых стоков представляет собой проблему огромной экологической и экономической значимости. Соли свинца, цинка, меди и других тяжёлых металлов (ТМ) снижают качество очистки сточных вод, угнетая культуры микроорганизмов активного ила водоочистных сооружений, нарушают водные и наземные экосистемы, создают угрозу для здоровья человека.

Широко известна способность высших грибов к поглощению из почвы и атмосферы ТМ и накоплению их значительных количеств в плодовых телах [1–3]. Если накопление ТМ съедобными грибами может ограничить их пищевое использование, то у грибов, вызывающих белую и бурую гниль древесины, способность сорбировать и накапливать ТМ даёт возможность применять их для селективного удаления металлов из промышленных и бытовых стоков [4]. Перспектива практического использования обитающих на древесине базидиомицетов в экобиотехнологиях определяет в настоящее время повышенный интерес к физиологии их роста в присутствии ТМ.

К числу перспективных грибов-биосорбентов ТМ относится вид *Trametes versicolor*, вызывающий белую гниль древесины. Грибы рода *Trametes* нашли широкое применение в различных отраслях промышленности: на их основе разрабатываются технологии получения лекарственных препаратов различного назначения, стимуляторов роста животных, пищевых добавок, а также современных способов утилизации отходов деревоперерабатывающей, текстильной и сельскохозяйственной промышленности. В связи с разносторонним практическим использованием разработаны технологии выращивания *T. versicolor* в погружённой культуре, обеспечивающие высокий урожай мицелия для получения биологически активных субстанций [5–7]. Кроме того, химический состав клеточных стенок и спектр метаболитов *T. versicolor*, так же, как и у других грибов белой гнили, имеет хороший потенциал для связывания ТМ [4]. Поэтому использование отходов мицелиальной биомассы гриба, получаемой в интересах фармацевтической

и пищевой промышленности, может явиться одним из способов сокращения затрат на процессы ремедиации промышленных сточных вод, загрязнённых ТМ, поскольку позволит избежать дополнительных затрат, связанных с наработкой биомассы грибного мицелия.

В литературе имеются сообщения о способности *T. versicolor* удалять из растворов токсичные ионы кадмия [8–10], никеля [11, 12], хрома, меди и свинца [11]. Несмотря на то, что большинство из этих исследований не вышли за рамки лабораторного эксперимента, изучение особенностей поглощения ТМ грибом *T. versicolor* из растворов является перспективным и может представлять интерес для разработки методов биоремедиации промышленных сточных вод.

В задачи данной работы входило изучение влияния меди, цинка и свинца на характер роста *Trametes versicolor* в погружённой культуре, накопление мицелиальной биомассы и тестирование способности гриба сорбировать ионы металлов из водных растворов.

Объекты и методы

Объектом исследований служил штамм *T. versicolor* 2263, полученный из коллекции Ботанического института им. В.Л. Комарова (г. Санкт-Петербург). Мицелий гриба выращивали в погруженной культуре на пивном сусле, разведённом до 4 ° Баллинга. В жидкую среду добавляли, в зависимости от варианта, различные концентрации солей меди (13–40 мг/л), цинка (10–70 мг/л) или свинца (20–200 мг/л) в пересчёте на катионы металла. Контролем служил вариант без добавления ионов металлов. В качестве посевого материала использовали культуру гриба, выращенного при 28 °С на суслоагаре. Из зоны роста семисуточной культуры гриба вырезали для инокуляции блоки 10 × 10 мм и вносили их в плоскодонные стеклянные колбы объёмом 1 л с жидкой питательной средой того же состава. Каждый вариант закладывали в трёх повторениях. Культивировали гриб на качалке (120 об./мин) в течение 7 сут при комнатной температуре. Биомассу гриба отде-

ляли фильтрованием, трёхкратно промывали дистиллированной водой, высушивали при 70 °С и измеряли гравиметрическим методом. Содержание металлов в мицелии определяли на атомно-адсорбционном спектрофотометре Shimadzu-AA-6800 после озоления в муфельной печи с последующим растворением зольного остатка в 1М HCl [13].

Статистическую обработку результатов проводили стандартными методами с использованием программы EXCEL.

Результаты и их обсуждение

В условиях погружённой качалочной культуры у *T. versicolor* наблюдали формирование иного морфотипа мицелия, чем при росте на плотных средах. Культура, в отличие от гомогенной волокнистой формы роста на сулоагаре, в жидкой среде того же состава образовывала обильно опушённые округлые или продолговатые структуры – пеллеты, представляющие собой скопления мицелиальной биомассы, в которой гифы гриба плотно соприкасаются друг с другом. Образование пеллет при глубинном культивировании в колбах на качалке и в ферментёрах особенно характерно

для грибов с димитической и тримитической гифальными системами [14], каким и является *T. versicolor* [15]. Рост мицелия в жидкой среде в виде пеллет, благодаря их хорошим механическим свойствам, обеспечивает грибу преимущество при сепарации [16]. Известно, что морфология пеллет может быть разнообразной и зависит от ряда факторов среды и условий культивирования. Важное значение имеют способ перемешивания и режим аэрации, кислотность (рН) и состав питательной среды.

Изучение образования пеллет в зависимости от наличия в среде ионов меди, цинка и свинца, позволило выявить следующие закономерности. В контроле, без добавления в среду ТМ, в первые трое суток формировались крупные (размером до 5 мм) пушистые и рыхлые пеллеты с компактным центром. По мере дальнейшего роста культуры и истощения питательных веществ на поверхности пеллет образовывались тяжёлые поискового мицелия, который разрастался во все стороны в поисках свежего питательного субстрата (рис. 1, А).

В присутствии свинца, цинка и меди морфология пеллет изменялась различным образом. При добавлении в среду Pb(II) об-

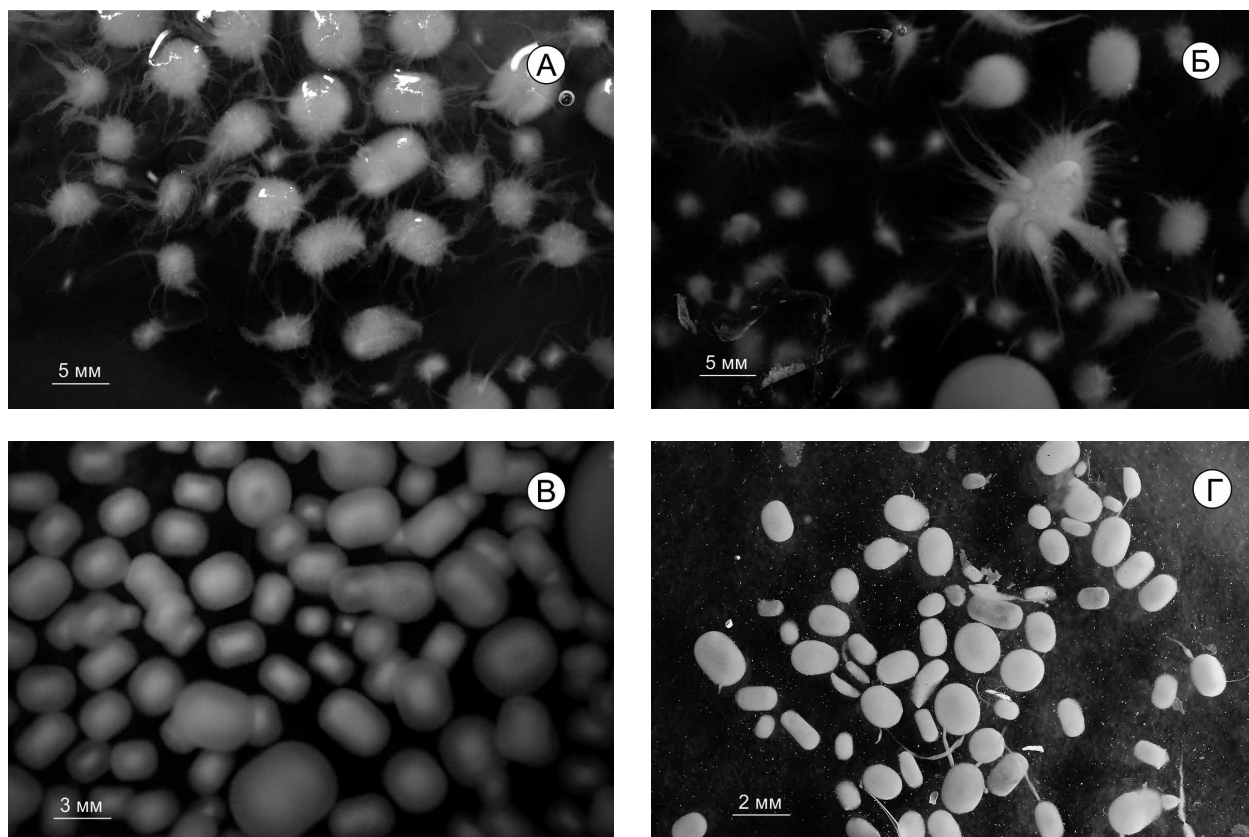


Рис. 1. Морфология мицелия *T. versicolor* в погружённой культуре в зависимости от наличия в среде ионов металлов: А – контроль, Б – Pb(II), В – Cu(II), Г – Zn(II)

разовывались пеллеты двух морфологических типов: сферические или яйцевидные, диаметр которых мог достигать 4–7 мм, и более крупные пеллеты сложного строения, состоящие из 5–8 субъединиц, заканчивающихся длинными периферическими отростками (рис. 1, Б). В присутствии Cu(II) и Zn(II) пеллеты становились гладкими с более плотной структурой и меньшими размерами (до 2–3 мм в вариантах с медью, до 1–2 мм в вариантах с цинком) и были достаточно однородны по своему объёму (рис. 1, В и Г). В отдельных случаях пеллеты в среде с добавлением Zn(II) имели единственный периферический отросток. Морфологические изменения, вызванные ТМ, являются, по-видимому, общими для всех групп грибов. Так, сообщалось, что пеллеты в Cd-содержащей культуре *Daedalea quercina* также имели гладкую поверхность [17]. Авторы объясняют это увеличением плотности гиф из-за увеличения числа ответвлений в точке ветвления и уменьшения расстояния между точками ветвления мицелия при добавлении в среду ТМ.

Кроме процессов морфогенеза пеллет, в погруженной культуре *T. versicolor* под влиянием ТМ изменялись также темпы роста гриба. В качестве критерия роста *T. versicolor* был использован выход воздушно-сухой биомассы. Количество формируемой грибом биомассы зависело от природы добавленного в питательную среду металла и его концентрации. Наибольшее количество биомассы гриба было получено при добавлении в среду 20 мг/л Cu(II), наименьшее – при введении в среду 70 мг/л Zn(II) (рис. 2). В значительной степени рост гриба угнетал свинец. Достоверное снижение в накоплении биомассы отмечено при добавлении в среду 40 мг/л Pb²⁺, а в присутствии 80 мг/л Pb²⁺ накопление биомассы снизилось по сравнению с контролем на 42%. Дальнейшее увеличение концентрации не усиливало ингибирующего действия ионов свинца на рост *T. versicolor*.

Более значительным оказалось влияние на накопление мицелиальной биомассы гриба ионов цинка. В результате добавления в среду 70 мг/л Zn²⁺ выход сухой биомассы снизился по сравнению с контролем почти на 70%. Однако в меньших концентрациях (20–40 мг/л) цинк оказывал на рост биомассы, напротив, стимулирующее влияние. Изменение характера действия цинка со стимулирующего на ингибирующий рост *T. versicolor* произошло в интервале концентраций 40–50 мг/л Zn²⁺.

Угнетение мицелиального роста гриба медью отмечали при добавлении в среду 40 мг/л

Cu²⁺. Биомасса *T. versicolor* при этом снизилась по сравнению с контролем на 28%. При добавлении в среду невысоких концентраций меди, как и в случае с цинком, наблюдали стимулирующее действие металла, но значительно более выраженное, чем действие цинка. Так, биомасса гриба в присутствии 20 мг/л Cu²⁺ возросла в 2,6 раза по сравнению с контролем (рис. 2). Цинк и медь в малых концентрациях жизненно необходимы для роста и развития гриба, но они являются токсичными, когда присутствуют в избытке.

Механизмы активной защиты грибов от токсичных металлов расшифрованы лишь частично. Как правило, защита основывается на иммобилизации ТМ с использованием внеклеточных и внутриклеточных хелатных соединений. К числу типичных внеклеточных хелаторов относится щавелевая кислота. Производство щавелевой кислоты грибами обеспечивает их средством для иммобилизации растворимых ионов металлов в виде нерастворимых оксалатов, уменьшая, таким образом, биодоступность металлов [18]. Есть сведения, что гриб *T. versicolor* продуцирует большое количество оксалатов [19, 20]. Как и другие грибы белой гнили, *T. versicolor* формирует внеклеточные гифальные оболочки – слизистый матрикс, состоящий, в основном, из полисахаридов. В этом внеклеточном слизистом матриксе были найдены у различных видов, включая *T. versicolor*, игольчатые кристаллы оксалата кальция, при этом они были связаны с наиболее старыми, более зрелыми гифами [21, 22]. Благодаря специфической структуре, внеклеточный полисахаридный матрикс и сам по себе может значительно способствовать иммобилизации ТМ.

Из изученных металлов *T. versicolor* наиболее эффективно удалял из раствора Pb(II), максимальная биосорбция для которого составила 21,3 мг/г сухой биомассы. Количество сорбированного мицелием цинка (до 2 мг/г сухого мицелия) на порядок уступало количеству сорбированного свинца. Количество меди, сорбированной грибным мицелием, было минимальным и не превышало 0,82 мг/г сухой биомассы гриба. Таким образом, степень извлечения металлов из растворов была различной, в зависимости от природы металла, и снижалась в порядке Pb(II) > Zn(II) > Cu(II), составив для свинца 42%, для цинка и меди – 14 и 10% соответственно. Это согласуется с представлениями о высокой избирательности грибов в связывании различных металлов. Между количеством сорбированных грибом

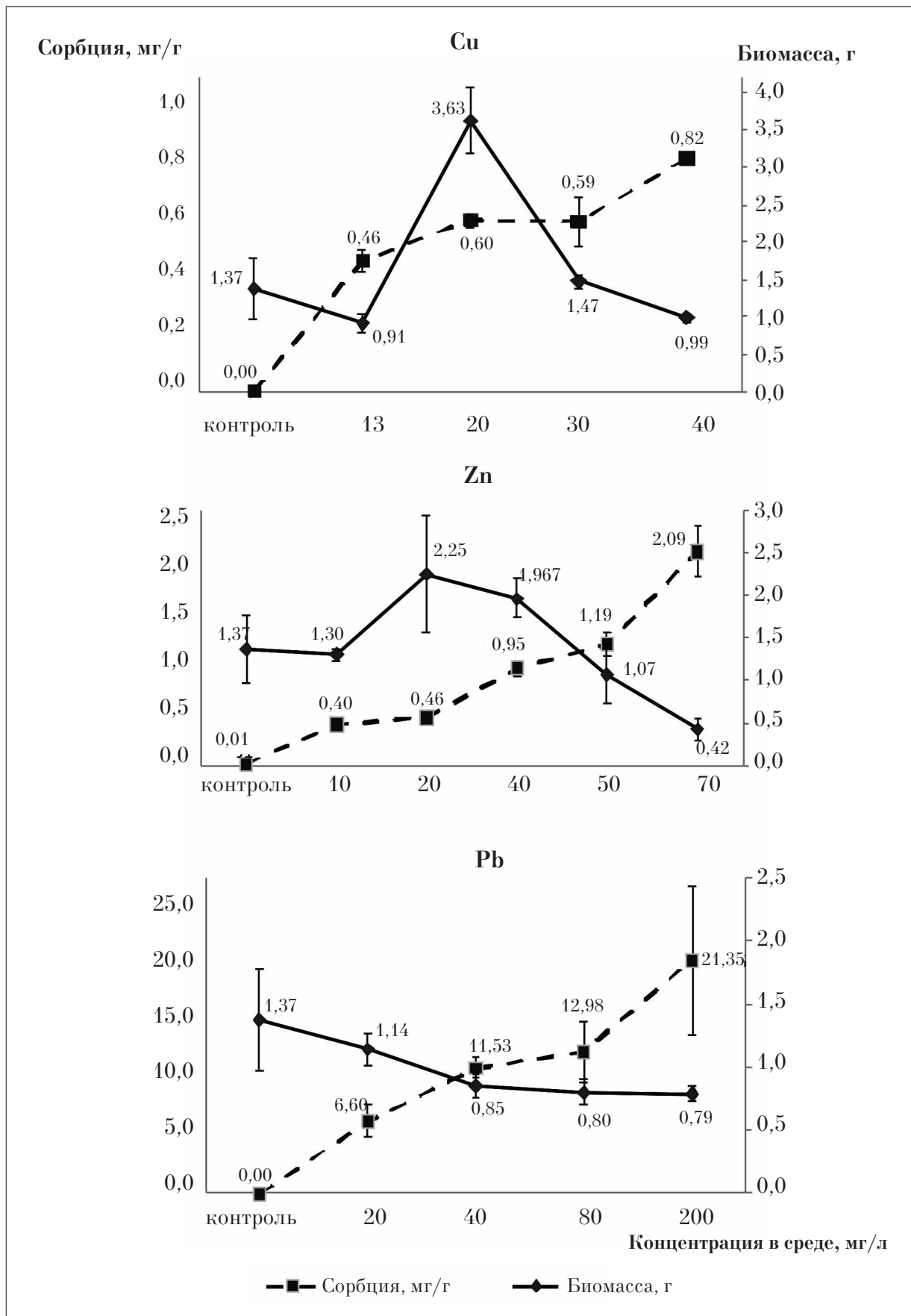


Рис. 2. Накопление биомассы и количество сорбированного металла грибом *T. versicolor* 2263 при выращивании в погружённой культуре с добавлением ионов Cu(II), Zn и Pb(II)

Литература

металлов и величиной накопления мицелиальной биомассы зависимости не установлено. Для всех исследованных в опыте ТМ сорбция грибным мицелием токсичных ионов увеличивалась параллельно увеличению исходной концентрации ионов металлов в жидкой среде.

Сопоставление полученных результатов с ранее известными из литературы показало, что порядок снижения биосорбционной ёмкости в ряду металлов и количество свинца, сорбированного мицелием *T. versicolor*, сопоставимы с приведёнными в работе, посвящённой тестированию грибов белой гнили на их сорбционную ёмкость [23]. Связывающая способность для свинца колебалась в диапазоне десятков миллиграммов на 1 грамм сухого веса. В отношении извлечения из растворов цинка и меди исследованный штамм проявил гораздо меньшую эффективность, чем в работах других авторов. Это может быть связано с использованием в экспериментах различных методических подходов, что сильно затрудняет количественное сопоставление результатов. Кроме того, способность к связыванию ТМ зависит от возраста мицелия и состава культуральной среды, используемой для выращивания [4]. В условиях единообразия методических подходов различия в устойчивости к ТМ могут присутствовать также в пределах штаммов одного вида [23].

Заключение

Изучено влияние ТМ на рост гриба *T. versicolor* 2263 в погружённой качалочной культуре и проведено его тестирование на способность связывать ионы свинца, меди и цинка. Полученные результаты дают основание рассматривать штамм *T. versicolor* 2263 в качестве перспективного кандидата на роль сорбента для селективного удаления ионов металлов (свинца в первую очередь) из загрязнённых ими растворов. Склонность данного гриба к росту в погружённой культуре в форме пеллет обеспечивает ему дополнительные преимущества при сепарации мицелия, как перспективному биотехнологическому агенту.

Ремедиация сточных вод с использованием отходов грибной биомассы от предприятий фармацевтической и пищевой промышленности может быть экономически выгодной, поскольку позволит осуществлять не только утилизацию этих отходов, но и обеспечит безотходность производства, создав на их основе высокотехнологичный продукт – биосорбент для извлечения ТМ из природных и сточных вод.

1. Иванов А.И., Костычев А.А., Скобанев А.В. Аккумуляция тяжёлых металлов и мышьяка базидиомами макромицетов различных эколого-трофических и таксономических групп // Поволжский экологический журнал. 2008. № 3. С. 190–199.

2. Костычев А.А. Накопление свинца и мышьяка плодовыми телами дикорастущих грибов в условиях Пензенской области // Современная микология в России. М.: Национальная академия микологии, 2012. Т. 3. С. 187.

3. Пельгунов А.Н., Пельгунова Л.А. Аккумуляция тяжёлых металлов грибами на территории национального парка «Плещеево озеро» // Поволжский экологический журнал. 2015. № 2. С. 215–219.

4. Baldrian P. Interactions of heavy metals with white-rot fungi // Enzyme and Microbial Technology. 2003. V. 32. P. 78–91.

5. Горшина Е. С., Скворцова М. М., Бирюков В. В. Технология получения биологически активной субстанции лекарственного гриба кориола опушёного // Биотехнология. 2003. № 2. С. 45–53.

6. Tišma M., Sudar M., Vasic-Rački D., Zelić B. Mathematical model for *Trametes versicolor* growth in submerged cultivation // Bioprocess Biosyst. Eng. 2010. 33. P. 749–758.

7. Bolla K., Gopinath B.V., Shaheen S.Z., Singara Charya M.A. Optimization of carbon and nitrogen sources of submerged cultur process for the production of mycelial biomass and exopolysaccharides by *Trametes versicolor* // International Journal for Biotechnology and Molecular Biology Research. May 2010. V. 1 (2). P. 15–21.

8. Gabriel J., Vosáhlo J., Baldrian P. Biosorption of cadmium to mycelial pellets of wood-rotting fungi // Biotechnol Tech. 1996. № 10. P. 345–348.

9. Arica M.Y., Kacar Y., Genc Ö. Entrapment of white-rot fungus *Trametes versicolor* in Ca-alginate beads: preparation and biosorption kinetic analysis for cadmium removal from aqueous solutions // Biores Technol. 2001. V. 80. P. 121–129.

10. Yalcinkaya Y., Soysal L., Denizli A., Arica M.Y., Bektas S., Genc Ö. Biosorption of cadmium from aquatic systems by arboxymethylcellulose and immobilized *Trametes versicolor* // Hydrometallurgy. 2002. V. 63. P. 31–40.

11. Yetis U., Özcengiz G., Dilek F.B., Ergen N., Dölek A. Heavy metal biosorption by white-rot fungi // Water Sci Technol. 1998. V. 38. P. 323–330.

12. Dilek F.B., Erbay A., Yetis U. Ni(II) biosorption by *Polyporus versicolor* // Process Biochem. 2002. V. 37. P. 723–726.

13. Отмахов В.И., Петрова Е.В., Пушкарева Т.Н., Островерхова Г.П. Атомно-эмиссионная методика анализа грибов на содержание тяжёлых металлов и исполь-

зование её для целей экомониторинга // Изв. Томского политех. унив. 2004. Т. 307. № 6. С. 44–46.

14. Широких А.А., Зарипова Г.Ф., Устюжанин И.А., Злобин А.А., Широких И.Г. Влияние компонентов питательной среды и условий культивирования на рост *Trametes versicolor* в мицелиальной культуре // Теоретическая и прикладная экология. 2014. № 3. С. 86–93.

15. Ильина Г.В., Ильин Д.Ю. Ксилотрофные базидиомицеты в чистой культуре. Пенза: РИО ПГСХА, 2013. 222 с.

16. Высшие съедобные базидиомицеты. Под общ. ред. И.А. Дудки Киев: Наук. думка, 1983. 312 с.

17. Gabriel J., Kofronova O., Rychlovský P., Krenželok M. Accumulation and effect of cadmium in the wood-rotting basidiomycete *Daedalea quercina* // Bull Environ Contam Toxicol. 1996. V. 57. P. 383–390.

18. Sayer J., Gadd G.M. Solubilization and transformation of insoluble inorganic metal compounds to insoluble metal oxalates by *Aspergillus niger* // Mycol. Res. 1997. V. 106. P. 653–661.

19. Shimada M., Akamitsu Y., Tokimatsu T., Mii K., Hattori T. Possible biochemical roles of oxalic acid as a low molecular weight compound involved in brown-rot and white-rot wood decays // J. Biotechnol. 1997. V. 53. P. 101–113.

20. Machuca A., Napoleao D., Milagres A.M.F. Detection of metalchelating compounds from wood-rotting fungi *Trametes versicolor* and *Wolfiporia cocos* // World J. Microbiol. Biotechnol. 2001. V. 17. P. 687–690.

21. Green F., Larsen M., Highley T. Ultrastructural morphology of the hyphal sheath of wood-rotting fungi modified by preparation for SEM // Biodeterior Res. 1990. V. 3. P. 311–325.

22. Dutton M.V., Evans C.S., Atkey P.T., Wood D.A. Oxalate production of basidiomycetes including the white-rot species *Coriolus versicolor* and *Phanerochaete chrysosporium* // Appl. Microbiol. Biotechnol. 1993. V. 39. P. 5–10.

23. Yetis Ü., Özcengiz G., Dilek F. B., Ergen N., Erbay A., Dölek A. Heavy metal biosorption by white-rot fungi // Water Science and Technology. 1998. T. 38. № 4–5. С. 323–330.

References

1. Ivanov A.I., Kostychev A.A., Skobanev A.V. Accumulation of heavy metals and arsenic basidiome of macromycetes of various ecologo-trophic and taxonomic groups // Povolzhskiy ekologicheskiy Zhurnal. 2008. № 3. P. 190–199 (in Russian).

2. Kostychev A.A. Accumulation of lead and arsenic in fruiting bodies of wild mushrooms in the conditions of the Penza region // Modern Mycology in Russia. M: National Academy of Mycology. 2012. T. 3. P. 187 (in Russian).

3. Pelygunov A.N., Pelygunova L.A. Accumulation of heavy metals by fungi in the national Park “Plescheevo

lake” // Povolzhskiy ekologicheskiy Zhurnal. 2015. № 2. P. 215–219 (in Russian).

4. Baldrian P. Interactions of heavy metals with white-rot fungi // Enzyme and Microbial Technology. 2003. V. 32. P. 78–91.

5. Gorshina E.S., Skvorchova M.M., Biryukov V.V. The technology of obtaining biologically active substances of the medicinal mushroom *cariola* Apostolo // Biotechnol. 2003. № 2. P. 45–53 (in Russian).

6. Tišma M., Sudar M., Vasic-Rački D., Zelić B. Mathematical model for *Trametes versicolor* growth in submerged cultivation // Bioprocess Biosyst. Eng. 2010. 33. P. 749–758.

7. Bolla K., Gopinath B.V., Shaheen S.Z., Singara Charya M.A. Optimization of carbon and nitrogen sources of submerged cultur process for the production of mycelial biomass and exopolysaccharides by *Trametes versicolor* // International Journal for Biotechnology and Molecular Biology Research. May 2010. V. 1 (2). P. 15–21.

8. Gabriel J., Vosáhlo J., Baldrian P. Biosorption of cadmium to mycelial pellets of wood-rotting fungi // Biotechnol Tech. 1996. № 10. P. 345–348.

9. Arica M.Y., Kacar Y., Genc Ö. Entrapment of white-rot fungus *Trametes versicolor* in Ca-alginate beads: preparation and biosorption kinetic analysis for cadmium removal from aqueous solutions // Biores Technol. 2001. V. 80. P. 121–129.

10. Yalcinkaya Y., Soysal L., Denizli A., Arica M.Y., Bektas S., Genc Ö. Biosorption of cadmium from aquatic systems by arboxymethylcellulose and immobilized *Trametes versicolor* // Hydrometallurgy. 2002. V. 63. P. 31–40.

11. Yetis U., Özcengiz G., Dilek F.B., Ergen N., Dölek A. Heavy metal biosorption by white-rot fungi // Water Sci. Technol. 1998. V. 38. P. 323–330.

12. Dilek F.B., Erbay A., Yetis U. Ni(II) biosorption by *Polyporus versicolor* // Process Biochem. 2002. V. 37. P. 723–726.

13. Otmachov V.I., Petrova E.V., Pushkareva T.N., Ostroverchova G.P. Atomic emission method of analysis of mushrooms on the content of heavy metals and its use for the purposes of environmental monitoring // Izv. Tomsk Polytechnic Univ. 2004. T. 307. № 6. P. 44–46 (in Russian).

14. Shirokikh A.A., Zaripova G.F., Ustyuzhanin I.A., Zlobin A.A., Shirokikh I.G. Effect of nutrient medium components and cultivation conditions on the growth of *Trametes versicolor* in mycelial culture // Teoreticheskaya i prikladnaya ekologiya. 2014. № 3. P. 86–93 (in Russian).

15. Ilyina G.V., Ilyin D.Yu. Xylotrophic basidiomycetes in pure culture. Penza: RIO PGSKHA, 2013. 222 p. (in Russian).

16. Higher edible basidiomycetes / Ed. I.A. Dudka. Kiev: Nauk. Dumka, 1983. 312 p. (in Russian).

17. Gabriel J., Kofronova O., Rychlovský P., Krenželok M. Accumulation and effect of cadmium in the wood-rotting basidiomycete *Daedalea quercina* // Bull Environ Contam Toxicol. 1996. V. 57. P. 383–390.
18. Sayer J., Gadd G.M. Solubilization and transformation of insoluble inorganic metal compounds to insoluble metal oxalates by *Aspergillus niger* // Mycol. Res. 1997. V. 106. P. 653–661.
19. Shimada M., Akamitsu Y., Tokimatsu T., Mii K., Hattori T. Possible biochemical roles of oxalic acid as a low molecular weight compound involved in brown-rot and white-rot wood decays // J. Biotechnol. 1997. V. 53. P. 101–113.
20. Machuca A., Napoleao D., Milagres A.M.F. Detection of metalchelating compounds from wood-rotting fungi *Trametes versicolor* and *Wolfiporia cocos* // World J. Microbiol. Biotechnol. 2001. V. 17. P. 687–690.
21. Green F., Larsen M., Highley T. Ultrastructural morphology of the hyphal sheath of wood-rotting fungi modified by preparation for SEM // Biodeterior Res. 1990. V. 3. P. 311–325.
22. Dutton M.V., Evans C.S., Atkey P.T., Wood D.A. Oxalate production of basidiomycetes including the white-rot species *Coriolus versicolor* and *Phanerochaete chrysosporium* // Appl. Microbiol. Biotechnol. 1993. V. 39. P. 5–10.
23. Yetis Ü., Özcengiz G., Dilek F. B., Ergen N., Erbay A., Dölek A. Heavy metal biosorption by white-rot fungi // Water Science and Technology. 1998. T. 38. № 4–5. C. 323–330.

УДК 581.192;549.67;546.47;546.732

Влияние цеолита и гидрофосфата натрия на биоаккумуляцию цинка и кобальта(II) растениями ячменя

© 2017. С. Г. Скугорева^{1,2,3}, к. б. н., магистрант, н. с., доцент,
Т. Я. Ашихмина^{2,3}, д. т. н., профессор, зав. лабораторией, зав. кафедрой,
А. К. Эсаулова³, студент, А. И. Фокина³, к. б. н., доцент,

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

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

³Вятский государственный университет,
610000, Россия, г. Киров, ул. Московская, д. 36,

e-mail: skugoreva@mail.ru, esaulova.a.k@gmail.com

В ходе модельного эксперимента изучено влияние цеолита (Ц) и гидрофосфата натрия (ГФН) на биоаккумуляцию цинка и кобальта(II) растениями ячменя *Hordeum distichum* L., выращенного на почвенном субстрате. Искусственное загрязнение субстрата создавали однократным внесением растворов солей тяжёлых металлов (ТМ) из расчёта 154,8 мг $\text{CoSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ и 662,4 мг $\text{ZnSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ на сосуд, что соответствовало 10 ПДК подвижных форм кобальта и цинка.

В результате эксперимента выявлены особенности аккумуляции цинка и кобальта растениями ячменя. При внесении ТМ в субстрат максимальные количества кобальта и цинка накапливали корни, играя роль защитного барьера на пути проникновения избыточных количеств элементов в побеги. В присутствии Ц и ГФН биоаккумуляция цинка снижалась в 2–4,5 раза и кобальта – в 2–32 раза. При совместном внесении солей кобальта и цинка Ц и ГФН снижали в большей мере поступление в растение цинка, не влияя на концентрацию кобальта.

Снижение аккумуляции цинка и кобальта в присутствии Ц и ГФН обусловлено сорбционной способностью цеолита и связыванием ТМ в нерастворимые фосфаты. В связи с этим можно рекомендовать внесение данных мелиорантов в загрязнённые соединениями цинка и кобальта почвы для снижения их биоаккумуляции растениями.

Ключевые слова: цеолит, гидрофосфат натрия, тяжёлые металлы, цинк, кобальт(II), ячмень, аккумуляция.

Effect of zeolite and sodium hydrogenphosphate on the bioaccumulation of zinc and cobalt(II) by barley plants

S. G. Skugoreva^{1,2,3}, T. Ya. Ashikhmina^{2,3}, A. K. Esaulova³, A. I. Fokina³,

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, Komi Republic, Russia, 167982,

³Vyatka State University,

36 Moskovskaya St., Kirov, Russia, 610000,

e-mail: skugoreva@mail.ru, esaulova.a.k@gmail.com

In the model experiment the influence of zeolite (Z) and sodium hydrogenphosphate Na_2HPO_4 on the bioaccumulation of zinc and cobalt(II) by the plants of barley *Hordeum distichum* L. grown on a soil substrate was studied. Artificial contamination of the substrate was created by a single application of solutions of heavy metal (HM) salts in amount of 154.8 mg of $\text{CoSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ and 662.4 mg of $\text{ZnSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ per vessel, which corresponds to 10 maximum allowable concentrations of mobile forms of cobalt and zinc.

As a result of the experiment, the specific features of the accumulation of zinc and cobalt by barley plants were revealed. When introducing HM into the substrate, the maximum amounts of cobalt and zinc were accumulated by roots, acting as a protective barrier in the way of penetration of excess quantities of elements into the shoot. In the presence of Z and Na_2HPO_4 bioaccumulation of zinc decreased by 2–4.5 times and cobalt – by 2–32 times. With the joint application of salts of cobalt and zinc, Z and Na_2HPO_4 mainly reduced the supply of zinc to the plant, without affecting the concentration of cobalt.

The decrease in the accumulation of zinc and cobalt in the presence of Z and Na_2HPO_4 is due to the sorption capacity of zeolites and the binding of HM to insoluble phosphates. In connection with this, it is possible to recommend the introduction of these ameliorants into compounds contaminated by zinc and cobalt to reduce their bioaccumulation by plants.

Keywords: zeolite, sodium hydrogenphosphate, heavy metals, zinc, cobalt(II), barley, accumulation.

Тяжёлые металлы (ТМ) относятся к стойким загрязняющим веществам, являясь высокотоксичными даже в относительно низких концентрациях для живых организмов и обладая способностью к биоаккумуляции. В то же время большинство ТМ относятся к эссенциальным элементам, а такие как цинк (Zn) и кобальт (Co), являются микроэлементами для высших растений. Zn участвует в азотном, фосфорном и углеводном обменах, способствует синтезу нуклеиновых кислот и белка. Он входит в состав 35 ферментов и активирует ещё 40 [4]. Co регулирует ростовые процессы, биосинтез белка, число хлоропластов. Он входит в состав витамина B_{12} (цианкобаламин), повышает иммунитет к болезням, участвует в синтезе ДНК и делении клеток [2].

Потребность в данных микроэлементах у растений разная: в больших количествах растениям необходим Zn, в меньших – Co. Так, содержание Zn в листьях 10–20 мг/кг сухой массы является дефицитным для растений, для Co содержание, равное 0,02–1 мг/кг сухой массы, соответствует нормальному [3].

В избыточных количествах эссенциальные элементы становятся фитотоксичными.

Поданным [4], содержание Zn 200 мг/кг сухой массы токсично для растений. Избыток Zn подавляет их рост, синтез хлорофилла, интенсивность фотосинтеза, вызывает хлороз листьев [3, 5]. Избыток Co вызывает межжилковый хлороз, побеление и отмирание участков листьев [3].

В литературе встречаются отдельные сведения о характере взаимодействия Zn и Co в растениях [6–8]. Однако сведений о влиянии различных сорбентов и химических агентов на биоаккумуляцию ТМ при их совместном присутствии в среде выращивания не так много.

Как правило, для инактивации ТМ используют мелиоранты: мел, известь, глауконит, торф, цеолит, диатомит, комплексные фосфаты. За счёт процессов фиксации ТМ в структуре минералов происходит уменьшение их подвижности и накопления растениями. Показано, что применение цеолита снижало содержание подвижного кобальта в почве на 10–20% [9]. Накопление Zn ячменем снижалось при внесении глауконита, мела, суперфосфата [10, 11]. По данным [12], фосфаты способны снижать подвижность Zn в почве.

Для снижения аккумуляции ТМ в растениях в работе использовали гидрофосфат натрия (ГФН) и цеолит (Ц). Гидрофосфат-ионы связывают Zn^{2+} и Co^{2+} в нерастворимые соединения, кроме того, фосфор – элемент питания растений, что также способствует снижению фитотоксичности ТМ. Цеолиты – кристаллические водные алюмосиликаты, содержащие ионы щелочных и щелочноземельных металлов. Благодаря строго определённым размерам пор (каналов) и внутренних полостей, они способны вступать в реакции ионного обмена с ТМ: $Zn^{2+} + Ca-Ц \rightarrow Ca^{2+} + Zn-Ц$.

В связи с этим целью работы было изучить влияние цеолита и гидрофосфата натрия на биоаккумуляцию цинка и кобальта(II) растениями ячменя *Hordeum distichum* L.

Объекты и методы исследования

Объект исследования – растения ячменя *Hordeum distichum* L. сорта «Новичок» ПР-1. Растения выращивали в пластиковых контейнерах объёмом 17,5 см x 12,1 см x 6,1 см, в которые помещали по 650 г сухого почвенного субстрата.

По актуальной и обменной кислотности субстрат для выращивания растений имел слабощелочную реакцию ($pH_{H_2O} = 7,5$; $pH_{KCl} = 7,1$) [13]. Содержание органического вещества в субстрате было достаточно низким – $3,3 \pm 0,5\%$. Подвижного фосфора содержалось 85 ± 19 мг P_2O_5 /кг, что соответствует средней

обеспеченности для растений [14]. Обменного калия в субстрате было 153 мг K_2O /кг, что свидетельствует о повышенной обеспеченности для растений. Содержание нитратного азота – $9,8 \pm 0,7$ мг/кг, что характеризует субстрат как низко обеспеченный для растений. Содержание подвижных и валовых форм большинства ТМ не превышало ПДК и ОДК (табл. 1), исключение составило содержание подвижных форм марганца – оно было несколько выше ПДК.

В каждый сосуд высеивали по 30 семян. Повторность опыта трёхкратная. Для снижения биоаккумуляции ТМ перед посевом в субстрат вносили цеолит из расчёта 42 г на сосуд, что соответствовало норме внесения для зерновых культур 20 т/га [19]. С этой же целью в субстрат вносили $Na_2HPO_4 \cdot 12H_2O$ в виде сухой соли массой 655 мг/сосуд, что соответствовало норме внесения 200 мг P_2O_5 /кг [20]. Соли металлов вносили однократно перед посевом в почвенный субстрат в виде растворов из расчёта 154,8 мг $CoSO_4 \cdot 7H_2O$ и 662,4 мг $ZnSO_4 \cdot 7H_2O$ на сосуд, что соответствовало внесению 10 ПДК подвижных форм кобальта и цинка [15].

Опыт включал три серии (табл. 2), контролем служил вариант без внесения солей ТМ, Ц и ГФН.

Сосуды с семенами помещали в контролируемые условия климатической камеры: фотопериод – 14 ч, освещённость – 1000 лк, температурный режим выращивания – 13 °С (ночь)/21 °С (день).

Таблица 1

Содержание тяжёлых металлов в почвенном субстрате, используемом в опыте, мг/кг

Тяжёлые металлы	Zn	Co	Cd	Pb	Mn	Ni	Fe	Cu
Содержание	$8,1 \pm 2,7$ 67±22	$0,060 \pm 0,025$ 6,0±1,7	$0,095 \pm 0,029$ 0,19±0,06	$3,8 \pm 0,8$ 14,0±2,9	158 ± 36 660±150	$1,6 \pm 0,5$ 67±19	$4,8 \pm 1,2$ 13300±3300	$0,70 \pm 0,16$ 15,4±3,5
ПДК	23 [15]	5 [15]	0,2 [17]	6 [15]	100 [15]	4 [15]	1000 [3]	3 [15]
ОДК	220 [16]	50 [18]	2,0 [16]	130 [16]	1500 [17]	80 [16]	38000 [15]	132 [16]

Примечание: над чертой приведены данные по содержанию подвижных форм, под чертой – валовых форм ТМ.

Таблица 2

Схема опыта по изучению влияния цеолита и гидрофосфата натрия на биоаккумуляцию цинка и кобальта растениями ячменя

Варианты		
1. Внесение солей ТМ	2. Внесение цеолита (Ц)	3. Внесение гидрофосфата натрия (ГФН)
Контроль (без ТМ)	Ц	ГФН
Zn	Zn + Ц	Zn + ГФН
Co(II)	Co(II) + Ц	Co(II) + ГФН
Zn + Co(II)	Zn + Co(II) + Ц	Zn + Co(II) + ГФН

Агрехимические показатели проб субстрата после проведения модельного опыта

Вариант	pH _{H2O}	pH _{KCl}	Содержание органического вещества, %	Содержание P ₂ O ₅ , мг/кг
Субстрат до опыта	7,5	7,1	3,3±0,5	85±19
Контроль	7,6	7,1	3,1±0,5	84±19
Ц	7,5	7,0	3,0±0,6	91±18
ГФН	7,6	7,1	3,0±0,6	167±33
Со(II)	7,5	7,1	2,8±0,6	68±14
Со(II)+ Ц	7,6	7,1	3,2±0,5	75±15
Со(II)+ ГФН	7,5	7,0	2,6±0,5	162±32
Zn	7,5	7,0	3,4±0,5	75±15
Zn + Ц	7,6	7,0	3,2±0,5	94±19
Zn + ГФН	7,5	7,0	2,6±0,5	148±30
Zn + Со(II)	7,5	7,0	2,7±0,5	81±16
Zn + Со(II)+ Ц	7,6	7,0	2,9±0,6	90±18
Zn + Со(II)+ ГФН	7,4	7,0	2,3±0,5	159±32

Примечание: измерения кислотности выполнены с погрешностью 0,1 ед. рН.

Через 17 сут с момента появления всходов растения извлекали из сосудов, отделяли надземную часть, корни отмывали. Растительный материал фиксировали при 105 °С, затем высушивали до постоянной массы при 70 °С, определяли содержание ТМ в корнях и побегах ячменя.

В почвенном субстрате до и после опыта определяли содержание валовых и подвижных форм ТМ методом атомно-абсорбционной спектроскопии [21]. Содержание органического вещества определяли фотометрически по методу Тюрина в модификации ЦИНАО: по количеству образовавшегося Cr³⁺ [22], кислотность – потенциометрически в водной и солевой вытяжках [23]. Содержание подвижного фосфора определяли по методу Мачигина [24], обменного калия – по методу Пейве [25], нитратного азота – по методу ЦИНАО [26].

Содержание Zn и Со в растениях определяли методом инверсионной вольтамперометрии на анализаторе «Экотест-ВА» [27]. Подготовку проб растений к анализу проводили по ГОСТ 26929-94 [28]. Для характеристики депонирующих свойств корня рассчитывали коэффициент задержки или акропетальный коэффициент (АК) как отношение содержания элемента в корне к его содержанию в побеге.

Результаты и их обсуждение

Влияние цинка, кобальта, цеолита и гидрофосфата натрия на агрохимические характеристики субстрата

После проведения модельного эксперимента анализировали кислотность, содержание органического вещества и подвижного фосфора в почвенном субстрате.

Установлено, что присутствие в субстрате сульфатов цинка и кобальта, гидрофосфата натрия и цеолита во взятых для опыта количествах не повлияло на кислотность субстрата (табл. 3). Содержание органического вещества варьировало в пределах от 2,3 до 3,4% и практически не отличалось от контроля во всех вариантах. Относительно низкое содержание органического вещества (2,3±0,5%) в варианте Zn + Со(II) + ГФН может быть обусловлено тем, что фосфаты металлов, не подвергающиеся разложению хромовой смесью, могут «обволакивать» частицы почвы, препятствуя проникновению окислительного раствора и разложению органического вещества внутри частиц.

Содержание подвижного фосфора в субстрате согласуется с условиями эксперимента. В вариантах с внесением ГФН в субстрате осталось 52–58% от суммы внесённого и исходного количества P₂O₅. Высокий вынос фосфора растениями ячменя может быть вызван тем, что на начальных стадиях онтогенеза для роста и развития растений требуются достаточные количества питательных веществ. Содержание P₂O₅ в других вариантах колебалось на уровне контроля.

Аккумуляция цинка и кобальта (II) растениями ячменя

В результате химического анализа были получены данные по накоплению Zn и Со

побегами и корнями растений ячменя в присутствии Ц и ГФН (рис. 1–2).

Аккумуляция цинка. В контрольном варианте Zn в корнях ячменя не обнаружен (рис. 1), содержание в побегах (9,7 мг/кг) не превышало среднего содержания в растениях (15–22 мг/кг) [29]. По данным [18], нормальное содержание Zn в молодых растениях ячменя составляет 60 мг/кг сухой массы, критическое среднее значение – 200 мг/кг сухой массы.

В других вариантах без внесения соли цинка содержание элемента в растениях было выше по сравнению с контролем, однако не превышало среднее количество в растениях.

Можно отметить общую закономерность для незагрязнённого цинком почвенного субстрата: аккумуляция в корнях ниже, чем в побегах ($AK < 1$). Исключение составил вариант с внесением Со, в котором содержание Zn в корнях было несколько выше, чем в побегах ($AK = 1,1$). Внесение цеолита и ГФН снижало накопление элемента в 2,6 и 2,9 раза соответственно.

Во всех вариантах, в которые была внесена соль цинка, отмечали наибольшее накопление элемента в корнях: АК варьировал от 1,6 до 4,3. Таким образом, основную барьерную функцию по снижению поступления Zn в растения выполняют корни. При проникновении

ионов металла в корни растений происходит его хелатирование и, как следствие, уменьшение подвижности. Цинк способен связываться с SH-группами фитохелатинов – богатых цистеином пептидов, локализующихся в тканях корней растений [30].

Максимальные количества Zn аккумулялировали растения в варианте с совместным внесением Со и Zn. Так, содержание Zn в корнях составило 260 мг/кг, что выше среднего в 12 раз и является критическим для молодых растений ячменя [18]. Использование цеолита и ГФН привело к снижению аккумуляции корнями в 4,5 и 2,4 раза соответственно, побегами – в 2 раза.

В варианте Zn содержание элемента в побегах было сопоставимо с вариантом Zn + Со(II) (≈ 60 мг/кг), а в корнях элемента содержалось меньше в 2,6 раза. Большую аккумуляцию Zn в корнях растений в данном варианте можно объяснить тем, что присутствие Со «стимулирует» накопление Zn в корнях. Внесение в субстрат цеолита не повлияло на накопление Zn, а внесение ГФН – снизило поступление Zn в побеги ячменя в 1,6 раза.

Аккумуляция кобальта. Содержание элемента в контрольном варианте (рис. 2) находилось в пределах нормы – 0,2–0,6 мг/кг [29]. По другим данным [18], нормальное

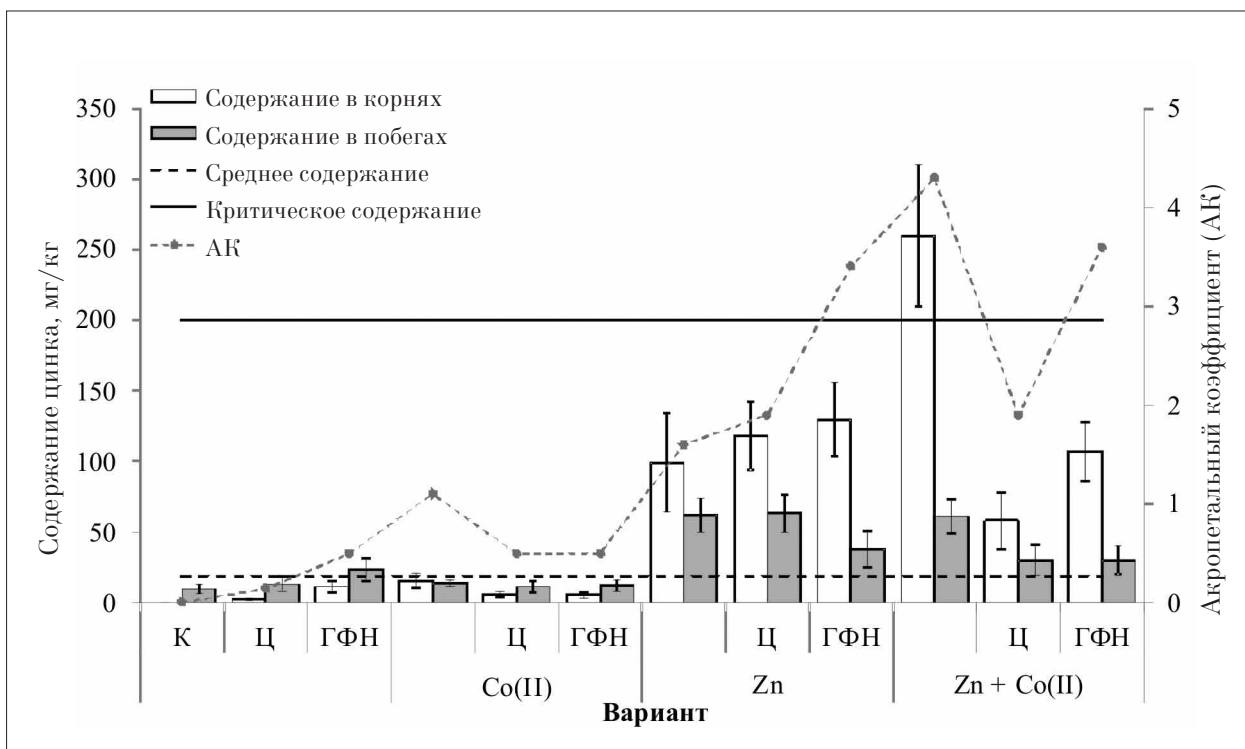


Рис. 1. Аккумуляция цинка растениями ячменя
 Примечание: К – контроль, Ц – цеолит, ГФН – гидрофосфат натрия

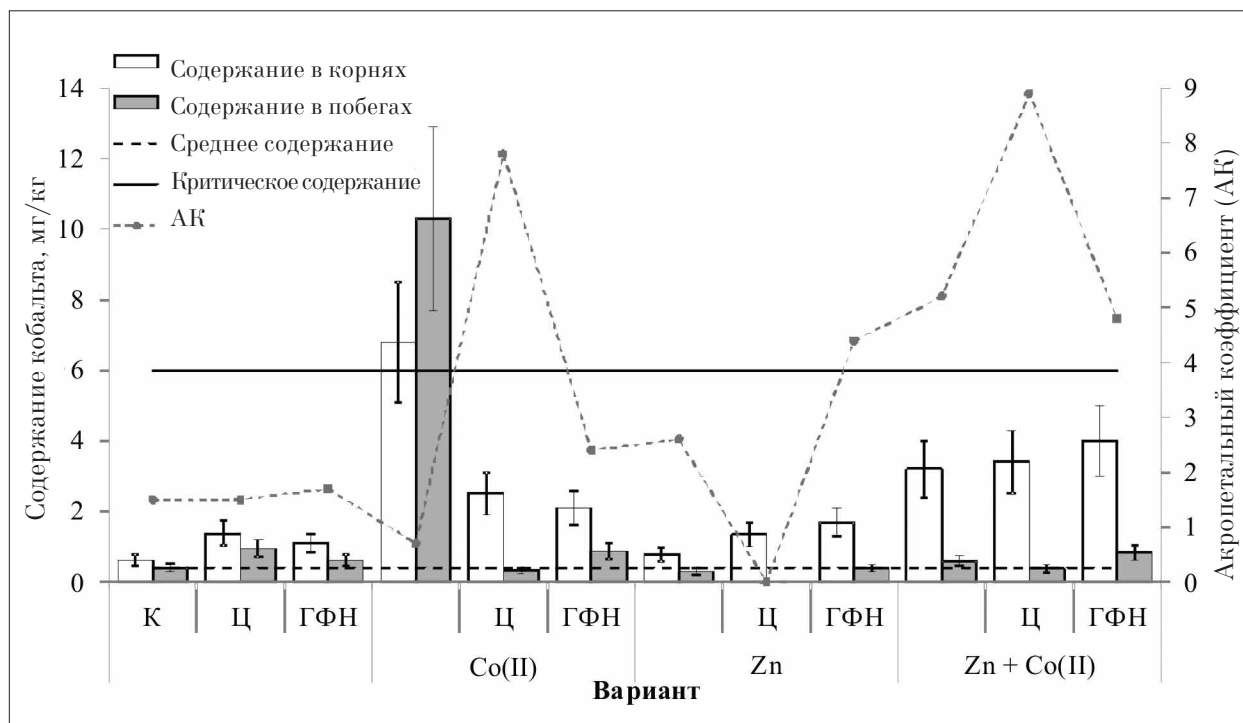


Рис. 2. Аккумуляция кобальта растениями ячменя
Примечание: К – контроль, Ц – цеолит, ГФН – гидрофосфат натрия

содержание Co в молодых растениях ячменя составляет 0,5 мг/кг сухой массы, среднее критическое значение – 6 мг/кг сухой массы.

Наибольшей степенью накопления Co отличались растения ячменя в варианте с внесением Co (10 ПДК подвижной формы) без добавки Ц и ГФН. Максимальное количество элемента, выше критического [18], определено в побегах – 10,3 мг/кг, несколько ниже было содержание в корнях – 6,8 мг/кг. Однако эти значения достоверно не различаются, так как погрешность по используемой методике достаточно высока (25%). В остальных вариантах аккумуляция Co в корнях растений превышала аккумуляцию в побегах: АК больше 1, что вполне согласуется с литературными данными [31, 32].

Акропетальный характер накопления Co, вероятно, объясняется отсутствием большой необходимости в нём растений. Известно, что Co способен связываться с гистидином и другими аминокислотами в хелаты в связи с большим сродством к азоту [33], что снижает его подвижность и затрудняет поступление в надземные части растений.

По сравнению с контролем, АК был выше в 4–4,5 раза в вариантах Co + Ц и Co + Zn + Ц. ГФН не оказывал большого влияния на АК.

В присутствии Ц и ГФН (Co + Ц, Co + ГФН) накопление Co корнями уменьшилось в 2,7 и 3,2 раза, побегами – снизилось более существенно – в 32 и 12 раз соответственно.

Данное снижение может быть обусловлено сорбционной способностью цеолита и связыванием ТМ в нерастворимые фосфаты.

Несколько меньшей степенью аккумуляции Co отличался вариант Zn + Co. Содержание элемента в побегах (0,61 мг/кг) и корнях (3,2 мг/кг) было в 17,0 и 2,1 раза ниже, чем в варианте с внесением соли Co. Присутствие цеолита и ГФН не приводило к изменению накопления Co ячменём. Вероятно, внесение Zn в субстрат снижает биоаккумуляцию Co, а цеолит и ГФН в большей степени связывают цинк, чем кобальт.

В варианте с внесением Zn содержание Co в растениях было на уровне контроля. Добавление цеолита и ГФН (Zn + Ц, Zn + ГФН) увеличивало содержание элемента в корнях ячменя в 1,8–2,1 раза, практически не влияя на содержание в побегах. Увеличение аккумуляции в корнях может быть связано с более высоким поглощением Co корнями ячменя в присутствии Ц и ГФН. Так, в вариантах Ц и ГФН отмечено большее содержание элемента в корнях, по сравнению с контролем (в 1,8–2,0 раза).

Данные факты дают основание полагать, что во взятых количествах ионы цинка и кобальта являются конкурентами за поступление в растение, за сорбцию цеолитом и связывание ГФН. Ионы металлов имеют много сходства: одинаковые эффективные ионные радиусы

для всех координационных чисел, вполне сравнимые константы устойчивости в комплексах со многими лигандами [34]. В связи с тем, что Zn относится к элементам сильного накопления, а Co – к элементам слабого накопления, в этой конкуренции при поглощении растениями «выигрывает» цинк.

Заключение

В результате проведённого эксперимента выявлены следующие особенности аккумуляции Zn и Co растениями ячменя.

1) Для кобальта, как в случае загрязнения субстрата, так и без него отмечали преимущественное накопление элемента в корнях ($AK > 1$). Наибольшее накопление элемента характерно для растений в варианте с внесением сульфата кобальта. В присутствии Ц и ГФН аккумуляция кобальта корнями уменьшилась в 2,7 и 3,2 раза, побегами – более существенно, в 32 и 12 раз соответственно.

2) Для незагрязнённого Zn субстрата аккумуляция элемента в корнях растений ячменя была ниже, чем в побегах ($AK < 1$). При загрязнении субстрата корень накапливал элемент больше ($AK > 1$), играя роль защитного барьера на пути проникновения избыточных количеств элемента в побег. Внесение в субстрат наряду с сульфатом цинка цеолита не влияло на накопление цинка, а внесение фосфатов – снижало в 1,6 раза поступление Zn в побеги ячменя.

3) При совместном внесении Co и Zn в почвенный субстрат аккумуляция Co корнями снижалась в 2,1 раза, побегами – в 17 раз; накопление Zn корнями возрастало в 2,6 раза, по сравнению с внесением отдельной соли металла. Ц и ГФН снижали поступление в растение Zn (в корнях в 4,5 и 2,4 раза, в побегах – 2 раза), практически не влияя на концентрацию Co. Таким образом, внесение Zn в субстрат снижает биоаккумуляцию Co, а присутствие Co в среде выращивания стимулирует накопление Zn. Цеолит и гидрофосфат натрия в большей степени связывают цинк, чем кобальт.

Снижение аккумуляции цинка и кобальта в присутствии цеолита и гидрофосфата натрия может быть обусловлено сорбционной способностью цеолитов и связыванием ТМ в нерастворимые фосфаты. В связи с этим можно рекомендовать внесение данных мелиорантов в загрязнённые соединениями цинка и кобальта почвы для снижения их биоаккумуляции растениями.

Работа выполнена в рамках государственного задания Вятского государственного университета по теме «Механизмы адаптации и устойчивости почвенной микробиоты к техногенному загрязнению» №5.4962.2017/БЧ и в рамках государственного задания Института биологии Коми НЦ УрО РАН по теме «Оценка последствий антропогенного воздействия на природные и трансформированные экосистемы подзоны южной тайги» № гос. регистрации 115020310080.

Литература

1. Кидин В.В., Торшин С.П. Агрохимия. М.: Проспект, 2016. [Электронный ресурс]: <https://books.google.ru> (Дата обращения 03.11.2016).
2. Смирнов П.М. Минеральные удобрения // Агрохимия. М.: Агропромиздат, 1989. С. 367–427.
3. Кабата-Пендиас А., Пендиас Х. Микроэлементы в почвах и растениях. М.: Мир, 1989. 439 с.
4. Фелленберг Г. Загрязнение природной среды. Введение в экологическую химию. М.: Мир, 1997. 228 с.
5. Башмаков Д.И., Лукаткин А.С. Эколого-физиологические аспекты аккумуляции и распределения тяжёлых металлов у высших растений. Саранск: Изд-во Мордов. ун-та, 2009. 236 с.
6. Chaudhury F.M., Loneragan J.F. Zinc absorption by wheat seedlings: II. Inhibition by hydrogen ions and by micronutrient cations // Soil Sci. Soc. Am. Proc. 1972. V. 36. P. 327–331.
7. Anisimov A.A., Ganicheva O.P. Possible interchangeability between Co and Zn in plants // Fiziol. Biochim. Kult Rast. V. 10. 1978. P. 613–617.
8. Berry W.L., Wallace A. Toxicity: The concept and relationship to the dose response curve // J. Plant Nutr. 1981. V. 3. P. 13–19.
9. Савельева В.А. Трансформация соединений кобальта в почвах при различных условиях увлажнения и внесения органического вещества: Автореф ... канд. биол. наук. М., 1998. 27 с.
10. Манджиева С.С., Минкина Т.М., Сушкова С.Н. Использование мелиорантов для предотвращения загрязнения растений цинком и свинцом // Научный журнал Российского НИИ проблем мелиорации. 2011. № 3 (03). [Электронный ресурс] https://elibrary.ru/download/elibrary_16995885_38716561.pdf (Дата обращения 29.05.2017).
11. Байкенова Ю.Г., Байкин Ю.Л. Эффективность технологий экогеохимической рекультивации почв (ТЭРП), загрязнённых тяжёлыми металлами (ТМ) // Аграрный вестник Урала. 2015. № 4 (134). С. 10–14.
12. Белоусова Ю.С. Состояние меди и цинка в системе «почва-растение» в условиях загрязнения: Автореф ... канд. биол. наук. М., 2013. 26 с.

13. Федотов В.Л. Почвоведение с основами растениеводства. Витебск: Изд-во УО ВГУ им. П.М. Машерова, 2003. 114 с.

14. Агрохимические методы исследования почв / Под ред. А.В. Соколова. М.: Наука, 1975. 655 с.

15. ГН 2.1.7.2042-06. Ориентировочно допустимые концентрации (ОДК) химических веществ в почве. Гигиенические нормативы. М.: Федеральный центр гигиены и эпидемиологии Роспотребнадзора, 2006. 8 с.

16. ГН 2.1.7.2041-06. Предельно допустимые концентрации (ПДК) химических веществ в почве. Гигиенические нормативы. М.: Федеральный центр гигиены и эпидемиологии Роспотребнадзора, 2006. 15 с.

17. Водяницкий Ю.Н. Нормативы содержания тяжёлых металлов и металлоидов в почвах // Почвоведение. М.: Наука, 2012. № 3. С. 368–375.

18. Ильин В.Б. Тяжёлые металлы в системе почва – растение. Новосибирск: Наука. Сиб. отд-ние, 1991. 151 с.

19. Рекомендации по применению цеолитсодержащей кормовой добавки «ТЕРРАВИТ» для сельскохозяйственных животных и птицы. Белгород. ФГОУ ВПО БелГСХА, 2009. 22 с.

20. Кравченко В.А. Методические указания и справочный материал для составления курсового проекта (работы) по системе применения удобрений в севооборотах. Елец: ЕГУ им. И.А. Бунина, 2007. 40 с.

21. ФР.1.31.2012.13573. Методика выполнения измерений массовых долей токсичных металлов в пробах почв атомно-абсорбционным методом. Москва, 2012. 16 с.

22. ГОСТ 26213-91. Почвы. Методы определения органического вещества. М.: Государственный комитет стандартизации и метрологии СССР, 1991. 8 с.

23. Аринушкина Е.В. Руководство по химическому анализу почв. М.: МГУ, 1970. 488 с.

24. ГОСТ 26205-91. Почвы. Определение подвижных соединений фосфора и калия по методу Мачигина в модификации ЦИНАО.

25. Жежель Н.Г., Пантелеева Е.И. Агрохимия. Л.: «Колос», Ленингр. отд-ние, 1972. 288 с.

26. ГОСТ 26488-85. Почвы. Определение нитратов по методу ЦИНАО.

27. Сборник методик выполнения измерений массовой концентрации ионов меди, свинца, кадмия, цинка, висмута, марганца, никеля и кобальта, методом вольтамперометрии на вольтамперометрическом анализаторе «Экотест-ВА». М.: НПП ООО «Эконикс-Эксперт», 2004. 61 с.

28. ГОСТ 26929-94. Сырье и продукты пищевые. Подготовка проб. Минерализация для определения содержания токсичных элементов. М.: Стандартиформ, 2010. 12 с.

29. Агрохимия / Под ред. В.М. Ключковского, А.В. Петербургского. М.: Колос, 1967. 583 с.

30. Скугорева С.Г., Огородникова С.Ю., Головки Т.К., Ашихмина Т.Я. Фитотоксичность фосфорорганических соединений и ртути. Екатеринбург: УрО РАН, 2008. 154 с.

31. Siedlecka A. Some aspects of interactions between heavy metals and plant mineral nutrients // Acta Soc. Bot. Pol. 1995. V. 64. № 3. P. 262–272.

32. Титов А.Ф., Таланова В.В., Казнина Н.М., Лайдинен Г.Ф. Устойчивость растений к тяжёлым металлам. Петрозаводск: Карельский научный центр РАН, 2007. 172 с.

33. Pearson R.G. Hard and soft acids and bases, HSAB. Part 1: Fundamental principles (англ.) // J. Chem. Educ. 1968. V. 45. № 9. P. 581–586.

34. Некоторые вопросы токсичности ионов металлов / Под ред. Х. Зигеля, А. Зигель. М.: Мир, 1993. 368 с.

References

1. Kidin V.V., Torshin S.P. Agrochemistry. M.: Prospekt, 2016. [Electronic resource]: <https://books.google.ru> (Date of the application 03.11.2016) (in Russian).

2. Smirnov P.M. Mineral fertilizers // Agrochemistry. M: Agropromizdat, 1989. P. 367–427 (in Russian).

3. Kabata-Pendias A., Pendias X. Microelements in soils and plants. M.: Mir, 1989. 439 p. (in Russian).

4. Fellenberg G. Pollution of the natural environment. Introduction to environmental chemistry. M.: Mir, 1997. 228 p. (in Russian).

5. Bashmakov D.I., Lukatkin A.S. Ecological and physiological aspects of accumulation and distribution of heavy metals in higher plants. Saransk: Izd-vo Mordov. un-ta, 2009. 236 p. (in Russian).

6. Chaudhury F.M., Loneragan J.F. Zinc absorption by wheat seedlings: II. Inhibition by hydrogen ions and by micronutrient cations // Soil Sci. Soc. Am. Proc. 1972. V. 36. P. 327–331.

7. Anisimov A.A., Ganicheva O.P. Possible interchangeability between Co and Zn in plants // Fiziol. Biokhim. Kult Rast. V. 10. 1978. P. 613–617.

8. Berry W.L., Wallace A. Toxicity: The concept and relationship to the dose response curve // J. Plant Nutr. 1981. V. 3. P. 13–19.

9. Savelyeva V.A. Transformation of cobalt compounds in soils under different conditions of wetting and application of organic matter: Avtoref ... kand. biol. nauk. M., 1998. 27 p. (in Russian).

10. Mandzhiyeva S.S., Minkina T.M., Sushkova S.N. Use of meliorants to prevent plant contamination with zinc and lead // Nauchnyy zhurnal Rossiyskogo NII problem melioratsii. 2011. № 3 (03). [Electronic resource] https://elibrary.ru/download/elibrary_16995885_38716561.pdf (Data of the application 29.05.2017) (in Russian).

11. Baykenova Yu.G., Baykin Yu.L. Efficiency of technologies of ecogeochemical reclamation of soils (TERP) contaminated with heavy metals (HM) // Agrarnyy vestnik Urala. 2015. № 4 (134). P. 10–14 (in Russian).

12. Belousova Yu.S. The state of copper and zinc in the system “soil-plant” in conditions of contamination: Avtoref ... kand. biol. nauk. M., 2013. 26 p. (in Russian).

13. Fedotov V.L. Soil science with the basics of plant growing. Vitebsk: Izd-vo UO VGU im. P.M. Masherova, 2003. 114 p. (in Russian).
14. Agrochemical methods of soil investigation / Ed. A.V. Sokolov. M.: Nauka, 1975. 655 p. (in Russian).
15. GN 2.1.7.2042-06. Approximate permissible concentration (ODC) of chemical substances in the soil. Hygienic standards. M.: Federalnyy tsentr gigiyeny i epidemiologii Rospotrebnadzora, 2006. 8 p. (in Russian).
16. GN 2.1.7.2044-06. The maximum permissible concentration (MPC) of chemicals in the soil. Hygienic standards. M.: Federalnyy tsentr gigiyeny i epidemiologii Rospotrebnadzora, 2006. 15 p. (in Russian).
17. Vodyanitskiy Yu.N. Norms for the content of heavy metals and metalloids in soils // Pochvovedenie. M.: Nauka, 2012. № 3. P. 368–375 (in Russian).
18. Ilin V.B. Heavy metals in the soil-plant system. Novosibirsk: Nauka. Sib. otd-niye, 1991. 151 p. (in Russian).
19. Recommendations for the use of zeolite-containing feed additive “TERRAWIT” for farm animals and poultry. Belgorod. FGOU VPO BelGSKhA. 2009. 22 p. (in Russian).
20. Kravchenko V.A. Methodical instructions and reference material for the formulation of a course project (work) on the system of application of fertilizers in crop rotations. Elets: EGU im. I.A. Bunina, 2007. 40 p. (in Russian).
21. FR.1.31.2012.13573. Method for performing measurements of mass fractions of toxic metals in soil samples by atomic absorption method. Moskva, 2012. 16 p. (in Russian).
22. GOST 26213-91. Soil. Methods for the determination of organic matter. M.: Gosudarstvennyy komitet standartizatsii i metrologii SSSR, 1991. 8 p. (in Russian).
23. Arinushkina E.V. Guidelines for the chemical analysis of soils. M.: MGU, 1970. 488 p. (in Russian).
24. GOST 26205-91. Soil. Determination of mobile compounds of phosphorus and potassium by the method of Machigin in the modification of CINAO. (in Russian).
25. Zhezhel N.G., Panteleyeva E.I. Agrochemistry. L.: “Kolos”, Leningr. otd-niye, 1972. 288 p. (in Russian).
26. GOST 26488-85. Soil. Determination of nitrates by the method of CINAO. (in Russian).
27. Collection of methods for performing measurements of the mass concentration of copper, lead, cadmium, zinc, bismuth, manganese, nickel, and cobalt ions by voltammetry on the voltammetric analyzer “Ecotest-VA”. M.: NPP OOO “Ekoniks-Ekspert”, 2004. 61 p. (in Russian).
28. GOST 26929-94. Raw materials and food products. Preparation of samples. Mineralization to determine the content of toxic elements. M.: Standartiform, 2010. 12 p.
29. Agrochemistry / Eds. V.M. Klechkovskiy, A.V. Petersburgskiy. M.: Kolos, 1967. 583 p. (in Russian).
30. Skugoreva S.G., Ogorodnikova S.Yu., Golovko T.K., Ashikhmina T.Ya. Phytotoxicity of organophosphorus compounds and mercury. Ekaterinburg: UrO RAN, 2008. 154 p. (in Russian).
31. Siedlecka A. Some aspects of interactions between heavy metals and plant mineral nutrients // Acta Soc. Bot. Pol. 1995. V. 64. № 3. P. 262–272.
32. Titov A.F., Talanova V.V., Kaznina N.M., Laydinen G.F. Stability of plants to heavy metals. Petrozavodsk: Karelskiy nauchnyy tsentr RAN, 2007. 172 p. (in Russian).
33. Pearson R.G. Hard and soft acids and bases, HSAB. Part 1: Fundamental principles (angl.) // J. Chem. Educ. 1968. V. 45. № 9. P. 581–586.
34. Some issues of toxicity of metal ions / Eds. X. Zigel, A. Zigel. M.: Mir, 1993. 368 p. (in Russian).

О возможности применения искусственных экосистем для обеспечения жизнедеятельности человека

© 2017. Ю. Л. Ткаченко, к. т. н., доцент,
Московский государственный технический университет им. Н. Э. Баумана,
105005, Россия, г. Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1,
e-mail: tkachenko@mail.ru

В статье предлагается использовать искусственные экосистемы, т. е. жилые модули, построенные по принципу замкнутости внутренних материальных потоков, для обеспечения жизнедеятельности человека в экстремальных условиях. Приведена схема круговорота вещества в модуле. Проведён обзор оборудования, которое целесообразно использовать для автономного энергоснабжения модуля и организации замкнутого газообмена и обратного водоснабжения внутри модуля. Рассмотрены виды растений, которые наиболее подходят для выращивания и получения растительного питания для обитателей модуля. В качестве купольного сооружения для размещения создаваемой искусственной экосистемы предлагается использовать полусферическую структуру Фуллера.

Ключевые слова: экстремальная жизнедеятельность, искусственная экосистема, автономное энергообеспечение, замкнутый газообмен, обратное водоснабжение, купольные сооружения.

On the possibility of using artificial ecosystems for maintenance of human life

Y. L. Tkachenko,
Bauman Moscow State Technical University,
5 2nd Baumanskaya St., Moscow, Russia, 105005,
e-mail: tkachenko@mail.ru

The article suggests how to use artificial ecosystems, i. e. residential units built on the principle of closure of internal material flows in order to ensure human life in extreme conditions, such as the Arctic, arid deserts, high mountains, in the areas of chemical and radioactive contamination. From the outside this artificial ecosystem requires only the influx of energy revenues which may be provided at the expense of local renewable sources: wind, sunlight, moving water, temperature difference, etc. Universal power supply may be a microbial battery, in which electricity is produced by microorganisms capable through metabolism to implement transfer of electrons.

The history of creation of artificially closed ecosystems is presented by the example of work on the program "Bios" at the Institute of Biophysics, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences (Krasnoyarsk). As a result it was proved that it is possible to obtain the necessary oxygen, food, and pure water due to cultivation of higher and lower plants in phototrophic links of an artificial ecosystem.

This article provides an experience-based diagram of the matter cycle in the module. The review of the equipment is given that should be used for a stand-alone power supply module and the organization of closed gas exchange and water recycling inside the module. The types of plants are suggested that suit for growing and producing vegetable supply for the inhabitants of the module.

As the dome structures for placement create an artificial ecosystem it is proposed to use a hemispherical structure designed by R. Buckminster Fuller. It consists of a symmetrical grid of flat triangular elements. The base of the dome is attached to the ground by means of screw piles. It is proposed to use polyethylene foam ("penolon") as a material for the cladding of the dome.

Keywords: extreme vital functions, artificial ecosystem, independent power supply, closed gas exchange, water recycling, dome structures.

При решении ряда задач, связанных с обороной страны, защитой населения в чрезвычайных ситуациях, природопользованием и восстановлением окружающей среды, часто возникает проблема обеспечения жизнедеятельности людей в экстремальных условиях. Неблагоприятные для человека внешние условия характерны, например, для территорий арктических и аридных пустынь, высокогорья, зон химического и радиационного загрязнения. Также, зачастую люди вынуждены вести длительные подземные или подводные работы. Поэтому представляется весьма актуальной разработка технических средств, позволяющих создать безопасную и комфортную жилую среду в таких условиях. Проблемы жизнедеятельности на территории Якутии и пути улучшения условий жизни людей в условиях Крайнего Севера, освещены, например, в работе [4].

Для решения указанных проблем, в данной статье предлагается использовать автономные жилые модули, построенные на основе принципов энергонезависимости и замкнутости внутренних материальных потоков. Так как эти принципы характерны для природной среды обитания, то внутреннюю среду создаваемого таким образом жилого модуля можно назвать искусственной экосистемой (ИЭС). Наиболее значимые результаты в области создания замкнутых ИЭС были получены во второй половине XX века при работе над проектом «Биос» в Институте биофизики СО РАН (г. Красноярск).

На установке «Биос-3» в 1972–1984 гг. проводились опыты по полной изоляции от внешней среды экипажа из трёх человек. Наиболее длительный эксперимент продолжался в течение 180 суток [2]. В результате была доказана возможность получения необходимого человеку кислорода, растительного питания и чистой воды за счёт культивирования высших и низших растений в фототрофном звене ИЭС.

В настоящее время, в результате развития нового научного направления «Функциональная экология» и опытов, проведённых на установке «Экотрон» в Институте фундаментальных проблем биологии РАН (г. Пущино), доказано, что для поддержания устойчивости химических и физических параметров внутренней среды, в ИЭС необходимо воспроизвести гетеротрофное звено в виде быстроразвивающегося почвоподобного субстрата, содержащего специально подобранный микробиоценоз [3, 4]. Вывод о том, что почва формируется как в длительном, «геологическом», так и в кратком (месяцы, годы) времени подтверждается данными, приведёнными в статье [5].

На основе известных результатов работ в области создания ИЭС, была составлена схема круговорота вещества внутри разрабатываемого автономного жилого модуля, показанная на рисунке.

В представленной схеме человек является замыкающим звеном всех химических и физических процессов, протекающих в ИЭС. Система включает в себя фитотрон для выра-

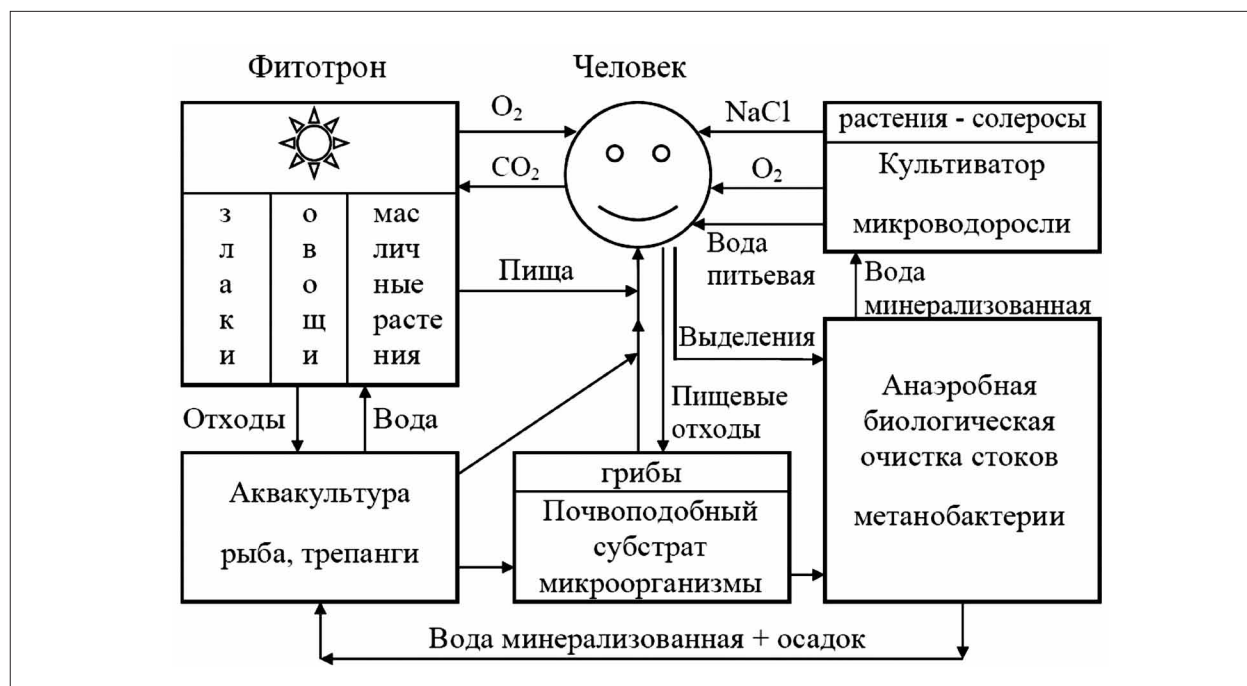


Рис. Схема внутренних материальных потоков в автономном жилом модуле

щивания высших растений, обеспечивающих растительную часть рациона обитателей модуля, ёмкость для формирования почвоподобного субстрата, систему утилизации органических отходов и анаэробной биологической очистки сточных вод, а также культиватор микроводорослей, вырабатывающих необходимый для дыхания кислород и опресняющих воду. Кроме того, в ИЭС предусмотрена возможность разведения аквакультуры за счёт использования оборотной воды и пищевых отходов, выращивания грибов на почвоподобном субстрате и высаживания в очищенную воду галофитной флоры – съедобных растений-солеросов для удаления избытка соли и возврата хлорида натрия в пищевую цепочку человека [6].

Для функционирования ИЭС требуется поступление энергии извне. Энергообеспечение автономного жилого модуля можно организовать с использованием солнечной, ветровой, геотермальной, приливной и биохимической энергии. В настоящее время разработаны новые типы устройств, позволяющие более эффективно утилизировать энергию Солнца, воздуха, воды и биомассы. Выбор конкретного вида природного энергоресурса и типа используемого электрогенератора определяется особенностями территории, на которой планируется размещение модуля.

Для модулей, размещаемых в полярной зоне, наиболее подходят ветрогенераторы, так как для арктических пустынь характерны сильные, часто повторяющиеся ветры. Наиболее целесообразно использовать летающие ветрогенераторы типа Buoyant Airborne Turbine (BAT) [7] и «летающее крыло» Wing 7 [8].

Для аридных пустынь, отличающихся большим числом дней солнечного сияния, целесообразно использовать солнечные батареи. В настоящее время разработаны бескремниевые прозрачные солнечные батареи Dye Solar Cell (DSC) на стеклянной основе с использованием оксида титана TiO_2 и красителей [9]. Основу DSC элемента составляет сэндвич из слоёв TiO_2 , красителя, электролита и катализатора, расположенный между двумя прозрачными проводящими электродами. При освещении элемента происходит разделение заряда благодаря инъекции из возбуждённого состояния молекул красителя в зону проводимости оксида титана. Свет возбуждает краситель, выбивая электрон, который захватывается полупроводниковым оксидом титана, генерируя при этом электрический ток. Краситель затем восстанавливается переносом электрона в окислительно-восстановительной паре.

Солнечные элементы на оксиде титана не зависят от угла падения света и могут устанавливаться вертикально и даже работать в преломлённом или отражённом свете. Элементы работают в очень широком интервале освещённости, благодаря большой внутренней поверхности оксида титана, которая представляет собой «световую губку», буквально «впитывающую» всю доступную энергию солнечного излучения. Из таких элементов можно выполнить облицовку граней купольной конструкции модуля даже в условиях холодного климата, так как элементы DSC эффективно работают в широком интервале температур.

Кроме фотоэлементных преобразователей, электричество из солнечного излучения можно получать при помощи двигателей Стирлинга. Компания Stirling Energy разработала Sun Catcher – «Ловец Солнца»: 25 кВт-ную параболическую антенну, состоящую из зеркал, со встроенным двигателем Стирлинга, изобретённым ещё столетие назад [10]. Особенность этого двигателя заключается в том, что газ, в отличие от двигателя внутреннего сгорания, циркулирует в двигателе по замкнутому циклу, нагреваясь в месте фокусирования солнечных лучей и охлаждаясь, совершает работу по вращению вала двигателя. Избыток тепла отводится с помощью радиатора с воздушным охлаждением. Такая конструкция делает генератор тихим, компактным и очень эффективным.

Универсальным источником энергоснабжения ИЭС могут стать микробные топливные элементы (МТЭЛ) [11], в которых электроэнергия вырабатывается микроорганизмами, способными в ходе своего метаболизма осуществлять перенос электронов. Протекающие при этом биохимические процессы аналогичны тем, которые происходят в анаэробных условиях при очистке сточных вод, что позволяет в перспективе совместить в одном устройстве функции генерации электроэнергии и утилизации органических отходов. Технологии утилизации отходов с помощью микроорганизмов описаны в работе [12].

Микроорганизмы и окисляемый субстрат (органические отходы) находятся в анаэробных условиях анодной камеры МТЭЛ. В данном отсеке содержится анод – электрод, на который микроорганизмы «сбрасывают» электроны. В другом отсеке МТЭЛ, катодной камере, находится, соответственно, катод, который аэрируется воздухом или чистым кислородом. Процессы жизнедеятельности микроорганизмов являются источником электронов. Для разделения анодной и катодной камер ис-

пользуются специальные протоннообменные мембраны, которые осуществляют однонаправленный перенос протонов, образовавшихся в результате жизнедеятельности микроорганизмов, из анодной камеры в катодную, и не дают кислороду возможность проходить в обратном направлении.

В качестве пищевых растений фототрофного звена используются виды, не требующие «ночного отдыха», т. е. способные производить фотосинтез биомассы при круглосуточном освещении. В экспериментальных оранжереях [13] уже достаточно хорошо исследованы следующие сорта: карликовая яровая пшеница селекционной линии 232, листовая салат сорта Мизуна, зелёный лук, томаты сорта Минибел, сладкий перец сорта Конфетка и масличная культура чужа. Выращивание растений может производиться в фитотроне методом разновозрастного конвейера в условиях искусственного освещения. Источником света являются белые светодиодные матрицы Bridgelux LED [14]. В качестве низших растений фототрофного звена, для обеспечения замкнутого газообмена, в фотобиореакторах можно культивировать зелёные микроводоросли [15].

Продукция фитотрона идёт в пищу человеку, а образующиеся отходы используются для выращивания аквакультуры. Разработанная компанией «GrowUp» технология позволяет создать систему, в которой отходы жизнедеятельности рыб используются для создания питательной среды для растений и наоборот, отходы пищевых растений служат кормом для рыб [16].

Для организации замкнутого водооборота можно использовать анаэробный метод биологической очистки сточных вод от органических веществ. В процессе многоступенчатого микробного метанового брожения сложные органические вещества превращаются в более простые компоненты, значительная часть которых затем переходит в биогаз (смесь CH_4 и CO_2), раствор минеральных солей и активный ил. При оптимальных условиях выход биогаза может составлять до 90–95% от массы первоначального органического вещества [17]. Образующийся биогаз можно использовать для резервного энерго- и теплоснабжения модуля с помощью микротурбинных установок, имеющих функцию рекуперации теплоты путём нагрева воды для обеспечения горячего водоснабжения.

В качестве сооружения для размещения ИЭС модуля целесообразно использовать куполообразную структуру, разработанную Р. Бак-

минстером Фуллером. Купол Фуллера состоит из симметричной сетки плоских элементов, наложенной на сферическую поверхность. Элементы сетки могут иметь треугольную, четырёхугольную или шестиугольную форму. Расчёт купола был произведён с помощью программы, представленной на сайте [18].

Проведённые расчёты показали, что для обеспечения жизнедеятельности 20 человек требуется 200 кВт электрической мощности, получаемой, например, от ветрогенератора. Для резервного энергоснабжения и горячего водоснабжения модуля используются две микротурбинные установки Calnetix, электрической мощностью 100 кВт каждая [19] и аккумуляторная батарея, состоящая из 48 568 шт. аккумуляторов СЦ-250Д-1 [20].

Использование для освещения фитотрона 900 светодиодных матриц, мощностью 200 Вт каждая, позволяет снабжать обитателей растительным питанием, которое вместе с добавками консервированной говядины, рыбы и свиного сала составляет рацион с пищевой ценностью (соотношением белков жиров и углеводов) 1,3:1,3,7 близкой к оптимальной (1:1:4), приведённой в [21]. Утилизация несъедобных частей растений может производиться биотой формирующегося ППС. Возможно также использование технологий, описанных в статье [22], позволяющих получить полезные для растений вещества, обладающие к тому же фунгицидным действием. Сферический метантанк способен полностью очищать 338 л воды в сутки. Для гарантированного обеспечения обитателей кислородом и удаления углекислого газа используются 14 полостных фотобиореактора ФБР-250 [23], в которых культивируется хлорелла обыкновенная.

Полусферический купол радиусом 6,87 м позволяет разместить внутри цилиндрический фитотрон высотой 5 м и радиусом основания 3,24 м. Основание купола крепится к грунту с помощью винтовых свай [24]. В качестве материала для облицовки купола предлагается использовать пенополиэтилен («пенолон») – прочный и эластичный вспененный многослойный физически сшитый материал с высокой теплоизоляцией [25]. Пенолон совместим со всеми конструкционными материалами, устойчив к ультрафиолетовому излучению, масло-, нефте- и бензостоек. Пенолон не гниёт и не выделяет вредных веществ при нагреве, нетоксичен и не имеет запаха.

Проведённый анализ показал, что в земных условиях нецелесообразно достижение полной замкнутости внутренней среды ИЭС.

Простым и менее затратным решением является разработка серии автономных жилых модулей, различающихся типом источника энергообеспечения, составом оборудования и конструкционными материалами купола. В результате было установлено, что наибольшей замкнутостью должна обладать ИЭС, предназначенная для применения в зонах радиационного загрязнения. Использование автономного модуля на таких территориях позволит снизить дозу хронического внутреннего облучения его обитателей за счёт предотвращения попадания в их организмы радионуклидов, мигрирующих в природных средах и биомассе.

При размещении на местности, купол модуля может соединяться переходными тамбурами с другими жилыми, техническими и складскими модулями, что позволяет компоновать из отдельных модулей достаточно большие поселения. В таких экопоселениях, кроме обеспечения замкнутости внутренних материальных потоков, необходимо создать ещё сферу занятости населения и организовать здоровую социальную среду для поддержания психологического комфорта жителей.

Литература

1. Шац М.М. Геоэкологические проблемы селитебных северных территорий (на примере г. Якутска) // Теоретическая и прикладная экология. 2009. № 3. С. 57–62.
2. Гительзон И.И., Дегерменджи А.Г., Тихомиров А.А. Замкнутые системы жизнеобеспечения // Наука в России. 2011. № 6. С. 4–10.
3. Керженцев А.С. Механизм функционирования почвы и устойчивость экосистем // Вестник РАН. 2010. Т. 80. № 6. С. 704–709.
4. Алексеева Т.В., Керженцев А.С. Микроморфологическое строение модельного почвенного профиля блока «Педотрон» экспериментальной установки «Эко-трон 97» // Почвоведение. 2005. Т. 38. № 3. С. 314–323.
5. Карпачевский Л.О., Зубкова Т.А. Экологическая роль информации в почве // Теоретическая и прикладная экология. 2011. № 2. С. 4–14.
6. Дегерменджи А.Г., Тихомиров А.А. Создание искусственных замкнутых экосистем земного и космического назначения // Вестник РАН. 2014. Т. 84. № 3. С. 233–240.
7. В США испытан первый летающий ветрогенератор. [Электронный ресурс] <http://supreme2.ru/4744-buoyant-airborne-turbine> (Дата обращения: 10.05.2016 г.).
8. Сайт «Знания об Энергии» Фонда ALCEN «От технологий к инновациям». [Электронный ресурс] <http://www.connaissancedesenergies.org/une-eolienne-prendson-envol> (Дата обращения: 10.05.2016 г.).
9. Технологии DSC. [Электронный ресурс] <http://www.ecoteco.ru/?id=286> (Дата обращения: 10.05.2016 г.).
10. Андреева К.А. Эпоха Стирлинга // Машины и механизмы. 2015. № 4. С. 8–15.
11. Микробы эффективно вырабатывают электричество из сточных вод [Электронный ресурс] <http://www.membrana.ru/particle/9964> (Дата обращения: 05.07.2016 г.).
12. Домрачева Л.И., Ашихмина Т.Я., Елькина Т.С., Гайфутдинова А.Р. Микробная деградация промышленных отходов (обзор) // Теоретическая и прикладная экология. 2014. № 2. С. 6–16.
13. Левинских М.А., Сычев В.А., Гушин В.И., Кареткин А.Г., Сигналова О.Б., Дерендяева Т.А., Нефедова Е.Л., Поддубко С.В., Подольский И.Г. Оранжерея в составе системы жизнеобеспечения эксперимента со 105-суточной изоляцией: биологические, технологические и психологические аспекты // Авиакосмическая и экологическая медицина. 2010. № 4. С. 57–61.
14. Каталог светодиодного оборудования Bridgelux. [Электронный ресурс] <http://msk.reled.pro/shop/product/svetodiodnaia-matritsa-200v-200-vt> (Дата обращения: 01.08.2016 г.).
15. Гладышев П.А. Разработка фотобиореакторов для замкнутых экологических систем жизнеобеспечения: Автореф. дисс. канд. техн. наук. М.: РХТУ им. Д.И. Менделеева, 2007. 16 с.
16. Сайт компании «GrowUp». [Электронный ресурс] <http://growup.org.uk/all-posts/photos-and-videos/gallery/the-growup-box> (Дата обращения: 01.08.2016 г.).
17. Кривошеин Д.А., Кукин П.П., Лапин В.Л. Инженерная защита поверхностных вод от промышленных стоков: Учебное пособие. М.: Высшая школа, 2003. 344 с.
18. Калькулятор для проектирования купольных конструкций Фуллера [Электронный ресурс] http://acidome.ru/lab/calc/#7/12_Cone_3V_R4.2_beams_150x50 (Дата обращения: 05.07.2016 г.).
19. Микротурбинная установка Calnetix TA-100 RCHP. [Электронный ресурс] <http://www.micro-turbines.ru/service.php?id=2&item=1> (Дата обращения: 01.08.2016 г.).
20. Сайт производителя аккумуляторов. ЗАО «Электронисточник» [Электронный ресурс] <http://elrsar.ru/production/silver/294/> (Дата обращения: 14.12.2016 г.).
21. Основы физиологии человека. Учебник для высших учебных заведений /Под ред. Б.И. Ткаченко. В 2-х томах. СПб.: Международный фонд истории науки, 1994. Т. 1. 567 с.
22. Хуршайнен Т.В., Скрипова Н.Н., Кучин А.Л. Высокоэффективная технология комплексной переработки растительного сырья и получение препаратов для сельского хозяйства // Теоретическая и прикладная экология. 2007. № 1. С. 46–49.
23. Сайт производителя оборудования для культивирования хлореллы. ООО «Дело» [Электронный ресурс]

<http://www.хлорелла.рф/equipment-for-clorella.html> (Дата обращения: 01.08.2016 г.).

24. Винтовая свая. Патент на полезную модель РФ № 77618. [Электронный ресурс] <http://poleznayamodel.ru/model/7/77618.html> (Дата обращения: 01.08.2016 г.).

25. Сайт производителя материала «пенолон». Компания «Русфом». [Электронный ресурс] <http://www.penolon.ru/mat-ppe-r-3050> (Дата обращения: 01.08.2016 г.).

References

1. Schatz M.M. Geo environmental problems of residential northern territories (the example of Yakutsk) // *Theoretical and Applied Ecology*. 2009. № 3. P. 57–62. (in Russian).

2. Gitel'zon I.I., Degermendzhi A.G., Tikhomirov A.A. The closed life-support system // *Nauka v Rossii*. 2011. № 6. P. 4–10 (in Russian).

3. Kerzhencev A.S. The mechanism of soil functioning and stability of ecosystems // *Vestnik RAN*. 2010. V. 80. № 6. P. 704–709 (in Russian).

4. Alekseeva T.V., Kerzhentsev A.S. Micromorphological structure of the soil profile of the model unit "Pedotron" of the experimental setup "Ekotron 97" // *Pochvovedenie*. 2005. V. 38, № 3. P. 314–323. (in Russian).

5. Karpachevsky L.O., Zubkova T.A. The ecological role of information in soil // *Teoreticheskaya i prikladnaya ekologiya*. 2011. № 2. P. 4–14 (in Russian).

6. Degermendzhi A.G., Tikhomirov A.A. Creating artificial closed ecosystems for terrestrial and space applications // *Vestnik RAN*. 2014. V. 84. № 3. P. 233–240 (in Russian).

7. The first flying wind turbine tested in the United States. [Electronic resource] <http://supreme2.ru/4744-buoyant-airborne-turbine> (Date of the application: 10.05.2016) (in Russian).

8. "Energy of Knowledge" Foundation Website ALCEN "From technology to innovation" [Electronic resource] <http://www.connaissancedesenergies.org/une-eolienne-prend-son-envol> (Date of the application: 10.05.2016) (in Russian).

9. DSC technology. [Electronic resource] <http://www.ecoteco.ru/?id=286> (Date of the application: 10.05.2016) (in Russian).

10. Andreeva K.A. Stirling's Epoch // *Mashiny i mekhanizmy*. 2015. № 4. P.8–15 (in Russian).

11. Microbes effectively generate electricity from wastewater [Electronic resource] <http://www.membrana.ru/particle/9964> (Date of the application: 05.07.2016) (in Russian).

12. Domracheva L.Y. Ashikhmina T.Ya., Elkina T.S., Gayfutdinova A.R. Microbial degradation of industrial waste (Review) // *Theoretical and Applied Ecology*. 2014. № 2. P. 6–16 (in Russian).

13. Levinskikh M.A., Sychev V.A., Gushchin V.I., Karetkina A.G., Signalova O.B., Derendyaeva T.A., Nefedova E.L., Poddubko S.V., Podolsky I.G. Greenhouse in the experiment of a life support system with 105-day isolation: biological, technological, and psychological aspects // *Aviakosmicheskaya i ekologicheskaya medicina*. 2010. № 4. P. 57–61 (in Russian).

14. Product Bridgelux LED equipment. [Electronic resource] <http://msk.reled.pro/shop/product/svetodiodka-matritsa-200v-200-vt> (Date of the application: 08.01.2016) (in Russian).

15. Gladyshev P.A. Development of photobioreactors for the closed ecological life support systems: Avtoref. ... kand. tekhnich. nauk. M.: RHTU im. D.I. Mendeleeva, 2007. 16 p. (in Russian).

16. The site of the Company "GrowUp". [Electronic resource] <http://growup.org.uk/all-posts/photos-and-videos/gallery/the-growup-box> (Date of the application: 08.01.2016).

17. Krivoshein D.A., Kukin P.P., Lapin V.L. Engineering protection of surface waters from industrial effluents: Textbook. M.: Vysshaya shkola, 2003. 344 p. (in Russian).

18. Calculator for design of Fuller dome structures [Electronic resource] http://acidome.ru/lab/calc/#7/12_Cone_3V_R4.2_beams_150x50 (Date of the application: 05.07.2016) (in Russian).

19. The microturbine setup Calnetix TA-100 RCHP. [Electronic resource] <http://www.micro-turbines.ru/service.php?id=2&item=1> (Date of the application: 08.01.2016) (in Russian).

20. The site of batteries manufacturer. ZAO "Elektroistochnik" [Electronic resource] <http://elrsar.ru/production/silver/294/> (Date of the application: 12.14.2016) (in Russian).

21. Fundamentals of human physiology. Textbook for higher educational institutions / Ed. B.I. Tkachenko. v 2 tomakh. SPb.: Mezhdunarodnyj fond istorii nauki, V. 1. 1994. 567 p. (in Russian).

22. Hurshkaynen T.V., Skripova N.N., Kuchin A.L. High-technology for complex processing of vegetable raw materials and formulation for agriculture // *Theoretical and Applied Ecology*. 2007. № 1. P. 46–49 (in Russian).

23. The site of the manufacturer of equipment for chlorella cultivation. Ltd. "Delo" [Electronic resource] <http://www.hlorella.rf/equipment-for-clorella.html> (Date of the application: 08.01.2016) (in Russian).

24. Screw pile. RF patent for useful model № 77618. [Electronic resource] <http://poleznayamodel.ru/model/7/77618.html> (Date of the application: 08.01.2016) (in Russian).

25. The site of the manufacturer of "penolon" material. "Rusfom" Company. [Electronic resource] <http://www.penolon.ru/mat-ppe-r-3050> (Date of the application: 08.01.2016) (in Russian).

К 80-ЛЕТИЮ АНАТОЛИЯ СЕМЁНОВИЧА КЕРЖЕНЦЕВА



С 27 по 29 октября 2016 г. в Подмосковном наукограде Пущино прошла научно-практическая конференция «Теоретические и практические аспекты функциональной экологии», посвящённая 80-летию Анатолия Семёновича Керженцева – д. б. н., профессора, лауреата Премии Правительства РФ. В докладах, представленных на конференции, отразились этапы становления нового научного направления *функциональная экология*, которой посвятил последние 30 лет своей деятельности профессор Керженцев.

Юбилейная конференция началась с демонстрации слайд-шоу из фотографий, на которых учёные из разных городов России, а также ближнего и дальнего зарубежья могли видеть А. С. Керженцева в лаборатории и экспедициях. Анатолий Семёнович отметил, что приехали коллеги, с которыми он работал в экспедициях ещё в Монголии и Тыве.

Первый доклад «Функциональная экология или физиология экосистем» сделал сам юбиляр, в котором обосновал изучение экосистем с позиций их метаболизма, направленного на поддержание гомеостаза за счёт регуляции функций синтеза и распада биомассы. Доказана необходимость встраивания антропогенного фактора не только в структуру экосистем, как это происходит сейчас, что приводит к дисбалансу и нару-

шению функционирования экосистем, но и необходимость принятия человеком на себя функций продуцента и консумента, а также и редуцента, для созданных человечеством новых веществ и возвращению изымаемых из биогеохимического круговорота биофильных элементов и органического вещества. Такой подход, с учётом сохранения «неснижаемого запаса» естественных экосистем, поддерживающих состав атмосферы, качество воды и много другого, позволит сохранить условия для выживания человечества.

Анатолий Семёнович, будучи учеником великого В. А. Ковды, прибыл из Забайкальского стационара, чтобы здесь организовать подобный стационар и станцию фонового мониторинга в Приокско-Террасном заповеднике. Учёные много ожидали от этих начинаний. Институт, благодаря усилиям Анатолия Семёновича, вошёл в международную программу «Человек и биосфера». Наблюдения в естественных экосистемах позволяли накопить знания о параметрах эталонных экосистем, чтобы по ним сверять изменения на техногенных территориях, разработать стандарты допустимой нагрузки в регионе. Но на тот момент было решено, что главное – это накормить население, а всё остальное – потом.

После встречи с д. т. н. Виктором Викторовичем Бугровским, разрабатывающим новые подходы к изучению живых систем, совместная работа позволила по-новому посмотреть на природные объекты. Ведь если бионика копирует у природы наиболее удачные решения для воплощения их в технике, то почему нельзя «подсмотреть» принципы организации сложных технических систем для понятия устройства живой природы? Действительно, технические науки достигли многого в создании сложных механизмов, вплоть до автономных подводных и летательных аппаратов! Теперь, используя дедуктивный подход, можно от общего перейти к частному. Начали с построения структурно-функциональных схем: дерева (организм как система), почвы (ценоз как система), экосистемы (многокомпонентная система надорганизменного уровня). Так, используя принципы устройства автономных аппаратов, подошли к пониманию иерархической организации сложных природных систем. Научились понимать, как все

разнообразие клеток, органов и организмов слагается в единую систему. Новый ракурс изучения объекта позволил увидеть новые его свойства.

Экосистему начали рассматривать как функциональную ячейку биосферы. Системный подход дал общий стержень изучения сложного объекта, позволил соединить разномасштабные и одновременные компоненты экосистемы. Это потребовало применения новых для экологии понятий, таких как целесообразность, частные и общие цели уровней и системы в целом. Построение структурно-функциональных схем помогло определить наиболее значимый критерий, связывающий разномасштабные части в единой иерархии системы, целесообразность её существования. Таким критерием стал метаболизм.

Действительно, геологическая роль «живого вещества» (в определении В. И. Вернадского) на Земле состоит в улавливании и преобразовании солнечной энергии. Зелёные растения, способные в процессе фотосинтеза преобразовывать минеральные вещества в органические, образуют сообщества так, чтобы максимально эффективно улавливать солнечную энергию в каждой климатической зоне. Почва выступает как биологический реактор, перерабатывающий биологическую продукцию и дозирующий минеральные поступления для нового цикла образования органики. Замкнутость круговорота органики в живых системах может достигать от 90 до 99%. Постоянно обновляющееся органическое вещество в экосистеме и процесс его преобразования в различных условиях среды являются физиологически значимыми для биосферы. А ведь о

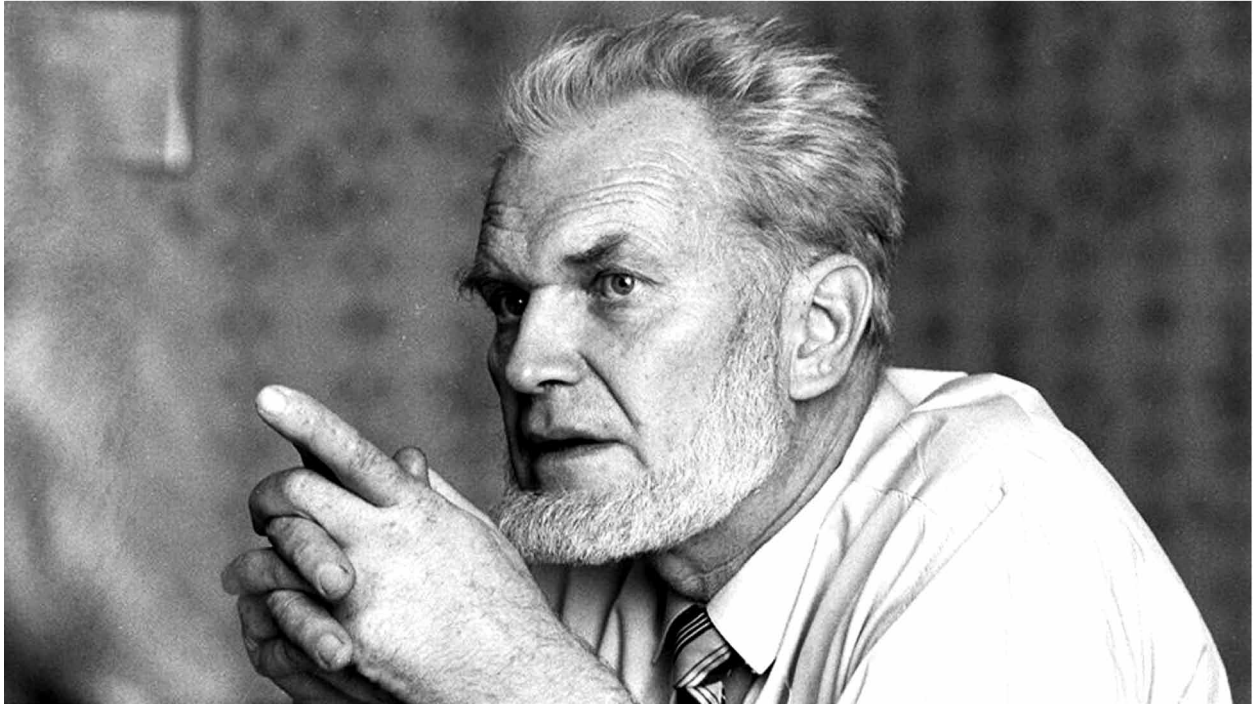
выделении именно физиологически значимого критерия, способного объединить ботанические, почвенные и климатические факторы, говорили предшественники функционального подхода – В. И. Вернадский, Л. Г. Раменский, В. А. Ковда и другие.

Главное, что ещё раз хочется подчеркнуть, это то, что новое научное направление «Функциональная экология», одним из основателей которого является Анатолий Семёнович Керженцев, было создано, окрепло и, благодаря его энергии и таланту, успешно развивалось в Институте, несмотря на немалые трудности.

Мы считаем, что эти качества: способность организовать плодотворную работу по новому научному направлению, способность учить и в то же время учиться самому, эрудиция и багаж знаний, позволяющих определять наиболее актуальные и интересные «точки» приложения сил молодых сотрудников, наконец, весьма высокая требовательность ко всему, что выходит из-под их пера, как раз и характеризуют Анатолия Семёновича как истинного Учёного и настоящего Учителя высочайшего профессионального уровня.

Анатолию Семёновичу исполнилось 80 лет. Знаменательный и далеко не последний юбилей! От всех учеников хочется пожелать ему новых творческих успехов, верных Учителю и преданных науке учеников, счастья, здоровья, долголетия!

Научные сотрудники
Лаборатории функциональной экологии
ИФПБ РАН,
Окского экологического фонда



ПАМЯТИ АЛЕКСЕЯ ЯБЛОКОВА (3 октября 1933 – 10 января 2017)

После тяжёлой болезни на 84-м году в Москве ушёл из жизни Алексей Владимирович Яблоков – выдающийся учёный, биолог, эколог, политик, общественный деятель, доктор биологических наук, профессор, член-корреспондент Российской академии наук.

Автор более 800 научных трудов, десятков монографий. Его основные научные труды посвящены теории эволюции и экологии, сохранению биосферы Земли, анализу влияния экологических рисков, загрязнения окружающей среды на жизнь и здоровье людей, в том числе – исследованию воздействий и последствий Чернобыльской катастрофы (1986).

Алексей Владимирович внёс большой вклад в ряд отраслей эволюционной биологии, зоологию и экологию, в теорию и практику исследований природы и охраны окружающей среды в СССР, России и во всем мире, в развитие экологического движения, в продвижение принципов демократии и свободы в научное сообщество.

Преданный ученик Н. В. Тимофеева-Ресовского, Алексей Владимирович много сделал для развития его научного наследия, создания и развития новых разделов эволюционной теории и её истории, что принесло ему огромный авторитет в стране и в мире как лидеру отечественной эволюционной мысли.

Его научные труды и учебники сыграли исключительную роль в утверждении современных эволюционных воззрений, повлияли на формирование поколений отечественных биологов, историков науки, философов.

Он был прекрасным организатором и лидером национальных и международных экологических организаций, лауреатом ряда международных премий по охране окружающей среды, руководителем экологической фракции политической партии «Яблоко» в России.

До конца жизни Алексей Владимирович вёл активную научную деятельность, в том числе написал цикл статей об управляемой эволюции биосферы: «Очерки биосферологии», завершающую статью согласовал для печати с соавторами в начале января 2017 г., она публикуется в данном выпуске журнала «Теоретическая и прикладная экология» и является частью его научного наследия и завещания нам.

Светлая память о выдающемся учёном и человеке навсегда в наших сердцах. Будем продолжать его и наше Общее Дело.

*Сергей Кричевский, Владимир Левченко,
Анатолий Керженцев, Тамара Ашихмина*

С. А. Тобратов "Интегральный параметр критических нагрузок как основа экологического нормирования загрязнения ландшафтов тяжёлыми металлами", С. 33

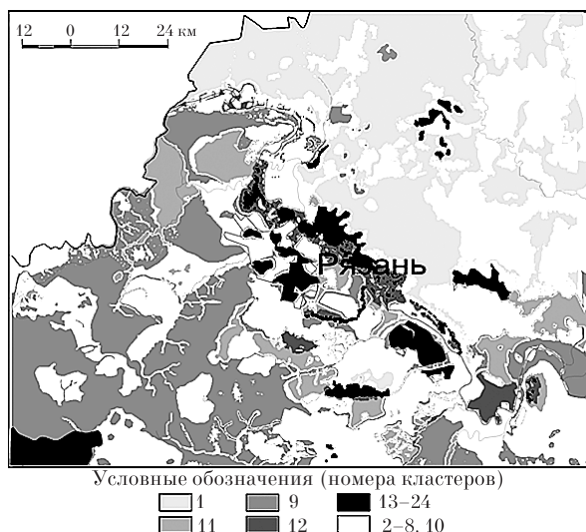
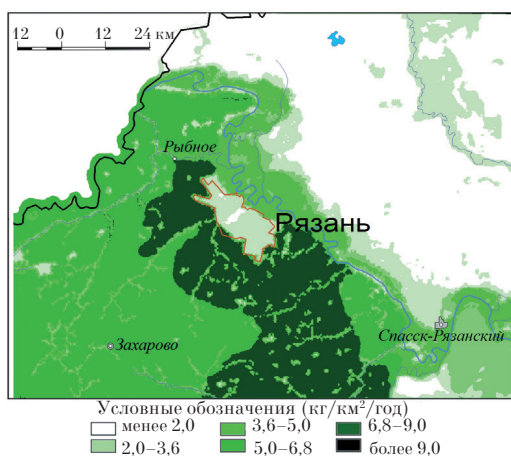
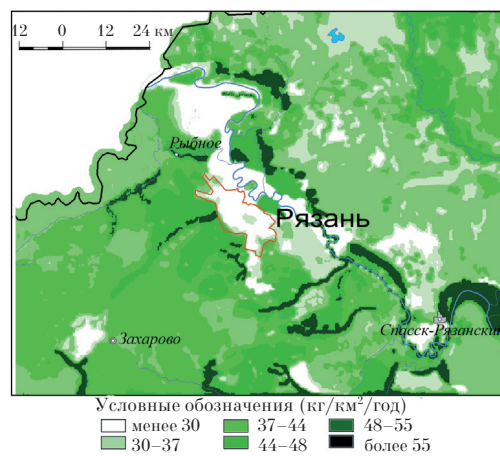


Рис. 1. Ареалы фоновых и техногенных почвенно-геохимических обстановок в центре Рязанского региона по результатам кластерного анализа

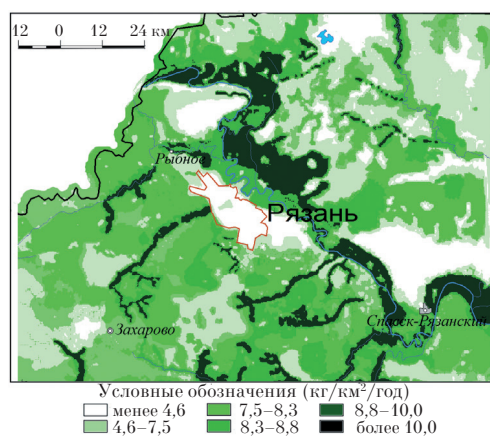
Примечание: кластер 1 – фон песчаных и органических (торфяных) почв Мещерской низменности; кластер 11 – фон легкосуглинистых почв Мещеры и севера Окско-Донской равнины; кластер 9 – фон средне- и тяжёлосуглинистых почв юга региона (чернозёмов и серых лесных); кластер 12 – фон пойменных аккумуляций; кластеры 13–24 – ареалы техногенного загрязнения почв тяжёлыми металлами; кластеры 2–8 и 10 – генетически неоднородны.



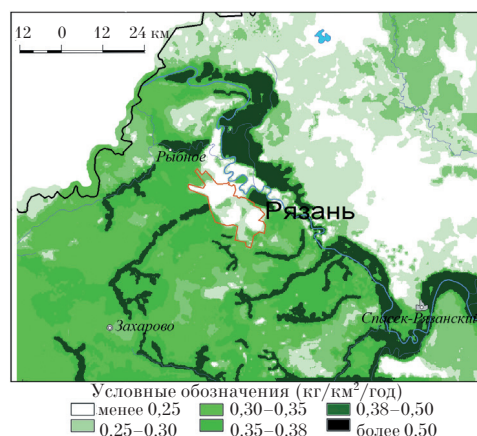
А – медь



Б – цинк



В – свинец



Г – кадмий

Рис. 3. Интегральные параметры критических нагрузок $IPCL(M)$

Индекс 82027, 48482



ISSN 1995-4301



9 771995 430004