



*Теоретическая  
и прикладная*

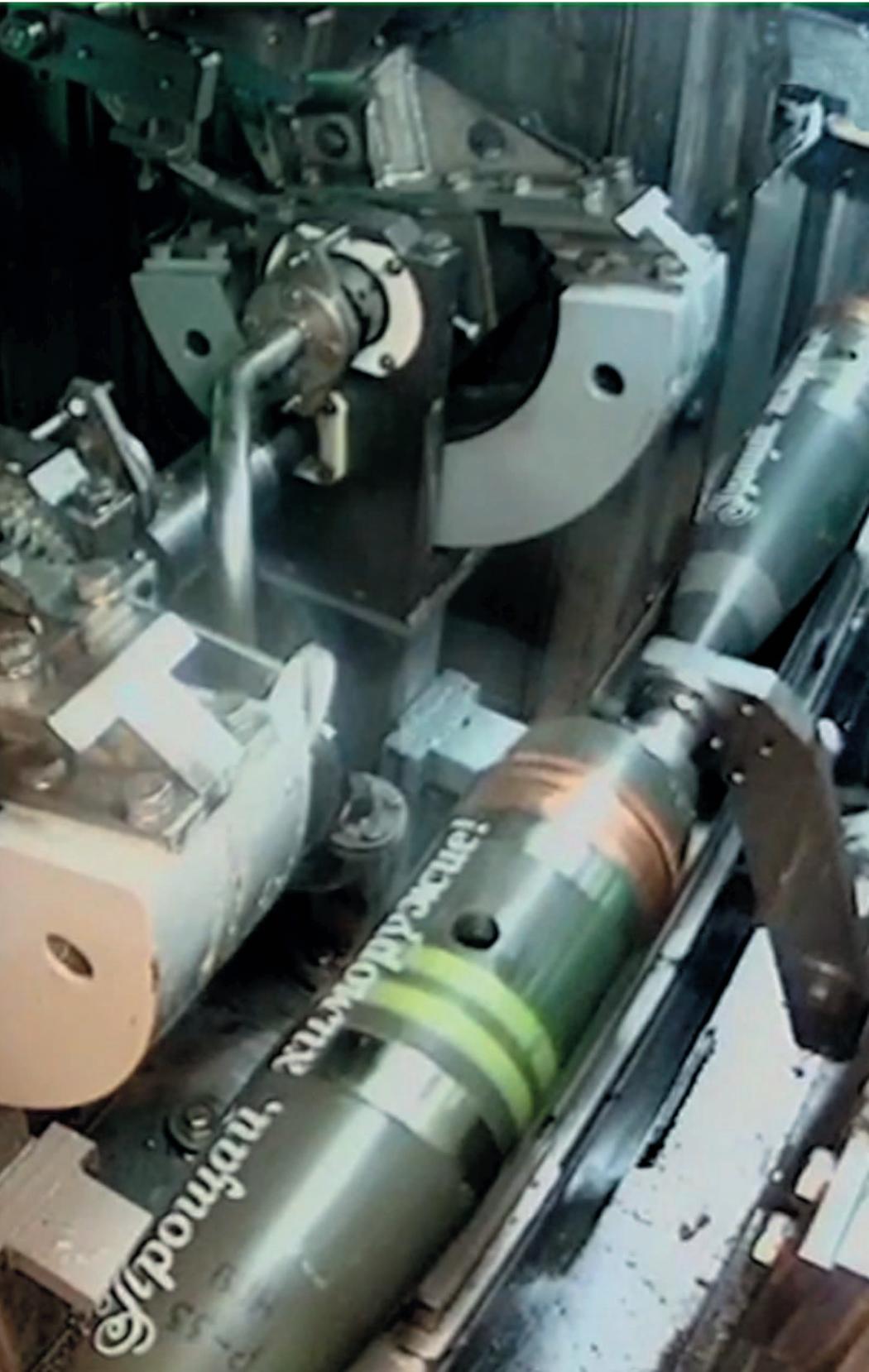
2017

<http://envjournal.ru>

**ЭКОЛОГИЯ**

ISSN 1995-4301

**№ 4**



**ВЫПОЛНЕНИЕ  
РОССИЕЙ  
КОНВЕНЦИИ О  
ЗАПРЕЩЕНИИ  
ХИМИЧЕСКОГО  
ОРУЖИЯ**

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

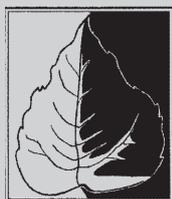
**МЕТОДЫ  
И ТЕХНОЛОГИИ  
РЕАБИЛИТАЦИИ  
ТЕРРИТОРИЙ**

**РЕМЕДИАЦИЯ  
И РЕКУЛЬТИВАЦИЯ**

**МОНИТОРИНГ  
НАРУШЕННЫХ  
ТЕРРИТОРИЙ**

**ХРОНИКА  
СОБЫТИЙ  
И МЕРОПРИЯТИЙ**

**РОССИЯ – СТРАНА БЕЗ ХИМИЧЕСКОГО ОРУЖИЯ**  
СПЕЦИАЛЬНЫЙ ВЫПУСК ЖУРНАЛА, ПОСВЯЩЁННЫЙ ЗАВЕРШЕНИЮ  
УНИЧТОЖЕНИЯ ХИМИЧЕСКОГО ОРУЖИЯ В РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ



**Теоретическая  
и прикладная  
ЭКОЛОГИЯ**  
№ 4, 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 Вятского государственного университета, зав. лабораторией 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 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 20.11.2017. 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, научный руководитель Президиума Коми НЦ УрО РАН
- Л.И. Домрачева** д.б.н., профессор Вятской государственной сельскохозяйственной академии
- М.В. Дородников** к. с.-х. н., научный сотрудник Университета Гёттингена им. Георга Августа (Германия)
- И.Е. Дубовик** д.б.н., профессор Башкирского государственного университета
- Г.П. Дудин** д.б.н., профессор, зав. кафедрой Вятской государственной сельскохозяйственной академии
- Г.А. Евдокимова** д.б.н., профессор, заместитель директора Института проблем промышленной экологии Севера Кольского НЦ РАН
- Г.М. Зенова** д.б.н., профессор Московского государственного университета им. М.В. Ломоносова
- Г.Я. Кантор** к.т.н., научный сотрудник Института биологии Коми НЦ УрО РАН
- В.Л. Коваленко** к.т.н., доцент Украинского государственного химико-технологического университета
- Е.Ю. Колбовский** д.г.н., профессор, ведущий научный сотрудник Московского государственного университета им. М.В. Ломоносова
- Э.И. Коломиец** д.б.н., академик НАН Беларуси, директор Института микробиологии НАН Беларуси
- Л.В. Кондакова** д.б.н., профессор Вятского государственного университета
- В.А. Коток** к.т.н., доцент Украинского государственного химико-технологического университета
- А.В. Кучин** д.х.н, член-корр. РАН, профессор, зав. отделом и зав. лабораторией Института химии Коми НЦ УрО РАН
- В.Н. Лажнецв** д.г.н., академик РАН, профессор, советник РАН
- В.З. Латыпова** д.х.н., член-корр. Академии наук Республики Татарстан, профессор Казанского федерального университета
- Ли Юй** профессор, директор Института микологии Цзилиньского аграрного университета, иностранный член РАН (КНР)
- С.Г. Литвинец** к.с.-х.н., проректор ВятГУ
- В.А. Малинников** д.т.н., профессор Московского государственного университета геодезии и картографии
- Н.В. Мищенко** д.б.н., доцент Владимирского государственного университета имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых
- А.А. Москалёв** д.б.н, член-корр. РАН, зав. лабораторией Института биологии Коми НЦ УрО РАН
- С.В. Пестов** к.б.н., доцент Вятского государственного университета
- С.А. Рубцова** д.х.н., директор Института химии Коми НЦ УрО РАН
- В.П. Савиных** д.т.н., член-корр. РАН, профессор, президент Московского государственного университета геодезии и картографии, лётчик-космонавт, дважды Герой СССР
- Ф. Скапини** д.б.н., профессор Университета Флоренции (Италия)
- В.А. Сысуев** д.т.н., академик РАН, научный руководитель Зонального научно-исследовательского института сельского хозяйства Северо-Востока им. Н.В. Рудницкого
- В.И. Холстов** д.х.н., руководитель центра аналитических исследований по Конвенциям о запрещении химического оружия ФГУП «ГосНИИОХТ»
- Т.А. Трифонова** д.б.н., профессор Московского государственного университета им. М.В. Ломоносова
- М.Х. Хусейн** д.б.н., профессор Университета Ассиут (Египет)



*Theoretical  
and applied*  
**ECOLOGY**  
№ 4, 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 Dymamoskiy 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. Alexeev**

Doctor in Technical Sciences, Professor of Udmurt State University

**A. M. Askhabov**

Doctor in Geology and Mineralogy, Academician of RAS, scientific director of the Komi Science Centre of the Ural Division RAS

**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. Evdokimova**

Doctor in Biology, Professor, Vice-Director of Research Institute of the North Industrial Ecology, Kola SC of RAS  
**G.M. Zenova** Doctor in Biology, Professor of Lomonosov Moscow State University

**G.M. Zenova**

**G.Ya. Kantor**

PhD in Technical Sciences, researcher of the Institute of Biology of the Komi Science Centre of the Ural Division RAS

**V.I. Kovalenko**

PhD in Technical Sciences, Associate Professor of Ukrainian State University of Chemical Technology

**E.Yu. Kolbovsky**

Doctor in Geography, the leading researcher, Professor of Lomonosov Moscow State University

**E.I. Kolomiyets**

Doctor in Biology, corresponding member of the National Academy of Sciences of Belarus, Director of Institute of Microbiology, National Academy of Sciences of Belarus

**L.V. Kondakova**

Doctor in Biology, Professor of Vyatka State University

**V.A. Kotok**

PhD in Technical Sciences, Associate Professor of Ukrainian State University of Chemical Technology

**A.V. Kuchin**

Doctor in Chemistry, corresponding member of RAS, Professor, scientific director Institute of Chemistry of the Komi Science Centre of the Ural Division of RAS

**V.N. Lazhentsev**

Doctor in Geography, Professor, RAS Advisor

**V.Z. Latypova**

Doctor in Agriculture, corresponding member of Tatarstan Academy of Sciences, Professor of Kazan Federal University

**Li Yu**

Director of Mycology Institute of Jilin Agricultural University, Foreign Associate of RAS (China)

**S.G. Litvinets**

PhD in Agricultural Sciences, Vice-Rector for Science and Innovation of Vyatka State University

**V.A. Malinnikov**

Doctor in Technical Sciences, Professor of Moscow State University of Geodesy and Cartography

**N.V. Mishchenko**

Doctor in Biology, Associate Professor of Vladimir State University named after Alexander and Nikolay Stoletovs

**A.A. Moskalev**

Doctor in Biology, corresponding member of RAS, Chief of the Laboratory of Institute of Biology of the Komi Science Centre of the Ural Division RAS

**S.V. Pestov**

PhD in Biology, Associate Professor of Vyatka State University

**S.A. Rubtsova**

Doctor in Chemistry, Director of the Institute of Chemistry the Komi Science Centre of the Ural Division RAS

**V.P. Savinykh**

Doctor in Technical Sciences, corresponding member of RAS, Professor, President of Moscow State University of Geodesy and Cartography, Pilot-Cosmonaut, twice Hero of the Soviet Union

**F. Skapini**

Doctor in Biology, Professor of Florence University (Italy)

**V.A. Sysuev**

Doctor in Technical Sciences, Academician of RAS, scientific director 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, Head of the Center for Analytical Studies on the Conventions on the Prohibition of Chemical Weapons of the Federal State Unitary Enterprise "State Scientific Research Institute of Organic Chemistry and Technology"

**M.Kh. Hussein**

Doctor in Biology, Professor of University of Assiut University (Egypt)

# СОДЕРЖАНИЕ

ВЫПОЛНЕНИЕ  
КОНВЕНЦИИ О  
ЗАПРЕЩЕНИИ  
ХИМИЧЕСКОГО  
ОРУЖИЯ

МЕТОДЫ  
ИССЛЕДОВАНИЙ,  
МОДЕЛИ  
И ПРОГНОЗЫ

МЕТОДЫ  
И ТЕХНОЛОГИИ  
РЕАБИЛИТАЦИИ  
ТЕРРИТОРИЙ

РЕМЕДИАЦИЯ  
И РЕКУЛЬТИВАЦИЯ

МОНИТОРИНГ  
НАРУШЕННЫХ  
ТЕРРИТОРИЙ

ХРОНИКА  
СОБЫТИЙ

*В. Д. Назаров* Огромный шаг на пути  
к глобальной безопасности .....4

*Д. Л. Поклонский, О. Ю. Дурилов, Д. А. Зыгин,  
В. А. Воронин, А. Ю. Исаева, Н. В. Ермилов* Биосенсоры  
для осуществления мероприятий экологического мониторинга:  
классификация и особенности разработки .....12

*С. Н. Кобцов, И. Х. Ильясов, И. Н. Исаев, Д. О. Веткин,  
Е. В. Четырина, Е. В. Максимова* Химические основы  
методик определения массовой доли основного вещества  
в стандартных образцах состава зарина и зомана .....20

*А. Ю. Исаева, Ю. И. Хрипков, Д. Л. Поклонский, Д. А. Зыгин,  
Е. А. Семёнов, Е. Е. Лагуткина* Совместное действие  
экологически опасных факторов .....25

*М. А. Шумилова, В. Г. Петров* Адсорбционные модели  
для описания равновесия в системе арсенит-ион – почва .....32

*С. А. Шаров, Т. Я. Ашихмина* Контроль эффективной  
работы системы очистки выбросов по составу отходов .....39

*В. П. Капашин, В. Г. Мандыч, В. А. Воронин, Т. В. Воробьев,  
И. В. Коваленко, А. В. Глазков* Некоторые аспекты  
комплексного подхода к обоснованному выбору  
технологии ликвидации опасных и токсичных  
промышленных отходов .....44

*В. П. Капашин, В. Г. Мандыч, В. А. Воронин, А. С. Лякин,  
И. Н. Исаев, И. В. Коваленко* Способы ликвидации опасных  
и токсичных промышленных отходов .....49

*А. А. Лещенко, И. П. Погорельский, Т. Я. Ашихмина,  
И. А. Лундовских, И. В. Дармов, С. Н. Янов, А. Г. Лазыкин,  
М. Р. Шабалина, И. А. Устюжанин, С. А. Шаров,  
Г. М. Рычков* Микробная биотехнология рекультивации  
почвы для санирования и устойчивого функционирования  
техногенной экосистемы .....54

*А. А. Янковская, И. В. Филимонов, Н. В. Завьялова,  
Е. Н. Ефременко, В. И. Холстов* Направления  
использования биотехнологических способов при ликвидации  
последствий работы объектов по уничтожению  
химического оружия .....66

*И. Г. Широких, Е. В. Товстик, А. А. Широких, Т. Я. Ашихмина*  
Функциональное разнообразие стрептомицетов в почвах лесных  
и луговых фитоценозов техногенных территорий .....74

*С. В. Пестов, Е. А. Домнина, О. И. Кулакова,  
А. Г. Татаринцев, А. В. Мазеева* Структура населения  
наземных беспозвоночных луговых экосистем южной тайги ....82

*Л. В. Кондакова, Л. И. Домрачева, К. А. Безденежных,  
И. А. Кондакова, Т. Я. Ашихмина* Почвенные водоросли  
и цианобактерии хвойных фитоценозов с разным  
уровнем антропогенной нагрузки .....91

*А. Г. Горохова, А. И. Иванов, Н. А. Язынина,  
С. Е. Ермолаев, М. В. Ферезанова* Содержание ртути  
в почвах и биологических объектах природных  
и техногенных территорий .....100

*А. П. Денисенко* Реализация ФЦП «Уничтожение запасов  
химического оружия в Российской Федерации»  
на территории Кировской области .....106

*Т. Я. Ашихмина* 25 лет Федеральному управлению по безопасному  
хранению и уничтожению химического оружия .....108

# CONTENTS

## IMPLEMENTATION OF CONVENTION ON PROHIBITION OF CHEMICAL WEAPONS

*V. D. Nazarov* A huge step on the way to global security .....4

## RESEARCH METHODS. MODELS AND FORECASTS

*D. L. Poklonsky, O. Yu. Durilov, D. A. Zygin, V. A. Voronin, A. Yu. Isaeva, N. V. Ermilov* Biosensors for environmental monitoring activities: classification and design features ..... 12  
*S. N. Kobtsov, I. Kh. Ilyasov, I. N. Isaev, D. O. Vetkin, E. V. Chetyrina, E. V. Maksimova* Chemistry of methods for determining the mass fraction of basic substance in certified reference material of the composition of sarin and soman ..... 20  
*A. Yu. Isaeva, Yu. I. Khripkov, D. L. Poklonsky, D. A. Zygin, E. A. Semenov, E. E. Lagutkina* Joint impact of ecologically dangerous factors ..... 25  
*M. A. Shumilova, V. G. Petrov* Adsorption models for describing equilibrium in the arsenite ion – soil system ..... 32  
*S. A. Sharov, T. Ya. Ashikhmina* Monitoring the effective operation of the emission cleaning system by waste composition .... 39

## METHODS AND TECHNOLOGIES OF TERRITORIES REHABILITATION

*V. P. Kapashin, V. G. Mandich, V. A. Voronin, T. V. Vorob`ev, I. V. Kovalenko, A. V. Glazkov* Some aspects of an integrated approach to the justified choice of technology for the elimination of hazardous and toxic industrial wastes ..... 44  
*V. P. Kapashin, V. G. Mandich, V. A. Voronin, A. S. Lyakin, I. N. Isaev, I. V. Kovalenko* Ways of eliminating hazardous and toxic industrial wastes ..... 49  
*A. A. Leshchenko, I. P. Pogorelsky, T. Ya. Ashikhmina, I. A. Lundovskikh, I. V. Darmov, S. N. Yanov, A. G. Lazykin, M. R. Shabalina, I. A. Ustyuzhanin, S. A. Sharov, G. M. Rychkov* Microbial biotechnology of soil remediation for sanitation and sustainable functioning of the technogenic ecosystem ..... 54

## REMEDICATION AND RECUITIVATION

*A. A. Yankovskaya, I. V. Filimonov, N. V. Zavyalova, E. N. Efremenko, V. I. Kholstov* Directions for use of biotechnological methods of liquidating the consequences of chemical weapons destruction ..... 66

## MONITORING DISTURBED AREAS

*I. G. Shirokikh, E. V. Tovstik, A. A. Shirokikh, T. Ya. Ashikhmina* Functional diversity of streptomycetes in soils of forest and meadow phytocoenoses of technogenic territories.... 74  
*S. V. Pestov, E. A. Domnina, O. I. Kulakova, A. G. Tatarinov, A. V. Mazeeva* Structure of terrestrial invertebrates community of meadow ecosystems in south taiga ..... 82  
*L. V. Kondakova, L. I. Domracheva, R. A. Bezdenezhnykh, I. A. Kondakova, T. Ya. Ashikhmina* Soil algae and cyanobacteria of coniferous phytocenosis with different levels of anthropogenic impact ..... 91  
*A. G. Gorokhova, A. I. Ivanov, N. A. Yazynina, S. E. Ermolaev, M. V. Ferezanova* Content of mercury in soils and biological objects of natural and technogenic territories ..... 100

## CHRONICLE OF EVENTS

*A.P. Denisenko* Implementation of the Federal Target Program “Destruction of chemical weapons stockpiles in the Russian Federation” on the territory of the Kirov region ..... 106  
*T. Ya. Ashikhmina* 25 years of the Federal Agency for the Safe Storage and Destruction of Chemical Weapons ..... 108

**Огромный шаг на пути к глобальной безопасности**

© 2017. В. Д. Назаров, д. т. н., профессор, г. н. с.,  
Научно-исследовательский центр Федерального управления по безопасному хранению и  
уничтожению химического оружия,  
115487, Россия, г. Москва, ул. Садовники, 4-а,  
e-mail: gcofubhuho@mail.ru

Обзор охватывает историю химического разоружения в России за период с 1987 г., когда Советский Союз в одностороннем порядке объявил о прекращении производства отравляющих веществ и призвал мировое сообщество полностью избавиться от химического оружия массового поражения, по 27 сентября 2017 г., когда на объекте «Кизнер», в торжественной обстановке, был уничтожен последний в Российской Федерации химический боеприпас. Успешное завершение процесса уничтожения химического оружия в России являет собой пример высочайшей организации и решения масштабного международного проекта. В ходе выполнения федеральной целевой программы «Уничтожение запасов химического оружия в Российской Федерации» (Программа) были решены сложнейшие научные, технические, технологические, организационные, кадровые и иные проблемы. Были разработаны высокоэффективные отечественные технологии, которые позволили обеспечить безопасное уничтожение химических боеприпасов с соблюдением самых жёстких экологических стандартов и требований. В процессе уничтожения химического оружия не было зафиксировано ни одного случая поражений работающего персонала и населения, а также нанесения какого-либо ущерба окружающей среде.

В промышленной зоне и в зоне защитных мероприятий объектов по уничтожению химического оружия были установлены уникальные, специально разработанные приборы контроля качества атмосферного воздуха, воды, почв. Постоянно отслеживалось состояние флоры и фауны. Медицинские службы, оснащённые новейшим оборудованием, пристально следили за здоровьем работающего персонала и местного населения.

В рамках реализации Программы не только безопасно уничтожены все запасы отравляющих веществ, но и внесён огромный вклад в социально-экономическое развитие регионов расположения объектов по хранению и уничтожению химического оружия. Улучшилось качество жизни граждан, увеличилась численность населения, появились хорошо оплачиваемые рабочие места.

Химического оружия на российской земле больше нет! Организация по запрещению химического оружия выдала соответствующие сертификаты, которыми подтверждается факт уничтожения химического оружия на российских объектах. Дальнейшая их работа в мирных целях позволит сохранить богатейший производственный потенциал, квалифицированные кадры и будет способствовать развитию уникальной социальной инфраструктуры регионов.

**Ключевые слова:** ликвидация химического оружия, обязательства по Конвенции, федеральная целевая программа.

**A huge step on the way to global security**

V. D. Nazarov,  
Research and development center of the Federal Directorate  
for Safe Storage and Destruction of Chemical Weapons,  
4a Sadovniki St., Moscow, Russia, 115487,  
e-mail: gcofubhuho@mail.ru

The review presents the history of chemical disarmament in Russia over the period from 1987 to 2017. The Soviet Union unilaterally announced termination of production of toxic substances and urged international community to get rid of chemical weapons of mass destruction. In 1993 the Russian Federation was one of the first signatories of the international Convention, and subsequently ratified it. Federal target program "Destruction of chemical weapons stockpiles in the Russian Federation" was enacted by Russia in 1996. The program called for destruction of chemical weapons on 7 plants specifically designed for this purpose. The plants were located in six regions of the country. On 27 September 2017 at the last plant "Kizner", in festive atmosphere, the last chemical weapons in the Russian Federation were destroyed. Successful completion of the process of chemical weapons destruction is an example of a largescale international project. In the course of its performance, thanks to a specially created Federal control, different scientific, technological, organizational, personnel problems were solved. Highly efficient domestic technologies were developed. In

the process of chemical weapons destruction not a single case of damage of the working personnel, the population, and the environment took place.

The industrial zone and the zone of protective measures of the chemical weapons destruction plants was equipped with unique, specially designed instruments and devices for monitoring quality of air, water, and soil. The state of flora and fauna was constantly monitored. Medical service equipped with the latest equipment thoroughly monitored health of the working personnel and of the local population.

Within the framework of the program not only all the stocks of chemical warfare agents were destroyed, but also a huge contribution was made into social-economic development of the regions with chemical weapons storage and destruction plants. Life quality improved, the population increased, new well-paid working places appeared.

There are no chemical weapons in Russia any more! The organization for prohibition of chemical weapons issued relevant certificates, which confirm the fact of chemical weapons destruction at our facilities. Their further work for peaceful purposes will preserve rich industrial potential, skilled personnel, and will contribute to development of a unique social infrastructure of the regions.

**Keywords:** elimination of chemical weapons, obligations under the Convention, federal target program.

27 сентября 2017 г. в Российской Федерации произошло поистине знаковое событие – на объекте «Кизнер» в Удмуртской Республике был уничтожен последний боеприпас, входящий в российский арсенал химического оружия.

Таким образом, Россия полностью выполнила обязательства по международной Конвенции о запрещении разработки, производства, накопления и применения химического оружия и о его уничтожении (Конвенция) [1, 2].

«Огромный шаг на пути к глобальной безопасности», – именно так Президент Российской Федерации В.В. Путин охарактеризовал полную ликвидацию запасов химического оружия в нашей стране.

История химического разоружения в России свидетельствует о нелёгком пути, который нам пришлось преодолеть.

К 1970–1980 гг. в мире были накоплены огромные запасы химического оружия, в том числе химического оружия нового поколения на основе высокотоксичных фосфорорганических отравляющих веществ (ОВ).

Объективно созрели условия для понимания того, что не только применение, но даже хранение химического оружия представляет собой серьёзную опасность. Данные обстоятельства, наряду с ослаблением военно-политического противостояния между США и СССР, позволили мировому сообществу к концу 80-х годов прошлого века согласовать текст будущей Конвенции о запрещении химического оружия.

В 1987 г. Советский Союз в одностороннем порядке объявил о прекращении производства ОВ и призвал мировое сообщество полностью избавиться от этого вида оружия массового поражения. После распада СССР, несмотря на трудности переходного периода, Россия, как правопреемница Советского Союза, про-

должила взятый курс на химическое разоружение.

С целью подготовки страны к началу практических работ в области химического разоружения 22 августа 1992 г. в войсках радиационной, химической и биологической защиты Министерства обороны Вооружённых Сил Российской Федерации было создано Управление ликвидации химического оружия (УЛХО).

При непосредственном руководстве УЛХО в начале 90-х годов был выполнен комплекс научно-исследовательских работ и на конкурсной основе проведён выбор технологий уничтожения люизита и фосфорорганических отравляющих веществ. Это позволило приступить к этапу разработки проектной документации по созданию объектов по уничтожению химического оружия, в первую очередь кожно-нарывных ОВ в пос. Горный Саратовской области и в г. Камбарка Удмуртской Республики.

В 1993 г. Российская Федерация одной из первых государств подписала международную Конвенцию, а в последующем её ратифицировала [1, 2].

Для выполнения Конвенции в 1996 г. в России была принята федеральная целевая программа «Уничтожение запасов химического оружия в Российской Федерации» (Программа) [3]. Данной Программе был придан статус президентской [4]. В соответствии с её положениями уничтожению подлежали все запасы химического оружия. А это около 40 тыс. т ОВ, которые были снаряжены в авиационные и артиллерийские химические боеприпасы различного типа и калибра, а также затарены в различные ёмкости. Программой предусматривалось уничтожение химического оружия на семи специально спроектированных и построенных для этих целей объектах, которые располагались в шести регионах страны. Ликвидации подлежала

и производственная база химического оружия: из 24 бывших объектов по производству химического оружия 8 производств подлежали ликвидации, а 16 – консерсии.

В 2000 и 2001 гг. Президент Российской Федерации и Правительство Российской Федерации приняли кардинальные меры для безусловного выполнения Конвенции. Так, была утверждена Государственная комиссия по химическому разоружению во главе с полномочным представителем Президента Российской Федерации в Приволжском федеральном округе С.В. Кириенко [5]. Российское агентство по боеприпасам было определено федеральным органом исполнительной власти с самыми широкими полномочиями. Оно стало государственным заказчиком работ по уничтожению химического оружия, которому были переданы функции Национального органа России по выполнению Конвенции [6].

Нужно отдать должное мудрой и дальновидной политике Президента Российской Федерации В.В. Путина, который в 2000 г. своим Указом сформировал Федеральное управление по безопасному хранению и уничтожению химического оружия (Федеральное управление) [7, 8].

Именно благодаря такому решению у государственного заказчика президентской Программы появилась действенная исполнительная структура. Её задачами стали организация непосредственных работ по созданию соответствующих объектов, необходимых для решения столь масштабной задачи, и эксплуатация созданных объектов по уничтожению химического оружия, включая обеспечение всех видов безопасности для работающего персонала, населения и окружающей среды.

Следует подчеркнуть, что в мире нет аналогов Федеральному управлению, те задачи, которые оно решало и продолжает решать, уникальны сами по себе. С начала формирования Федерального управления и по настоящее время руководителем Управления является доктор технических наук, профессор, дважды лауреат премии Правительства Российской Федерации в области науки и техники, генерал-полковник Валерий Петрович Капашин.

Впервые в мировой практике на промышленном уровне Федеральное управление приступило к уничтожению запасов химического оружия и довело этот процесс до своего логического завершения.

Практические работы по ликвидации химического оружия начались в декабре 2002 г.

с запуска в пос. Горный Саратовской области первого промышленного объекта по уничтожению кожно-нарывных отравляющих веществ, хранящихся в различных ёмкостях.

Процесс уничтожения запасов химического оружия в нашей стране был разделён на четыре этапа.

I этап Программы завершился в апреле 2003 г. На объекте «Горный» было уничтожено 400 т иприта, что составляло 1% общих запасов химического оружия.

II этап Программы был выполнен в апреле 2007 г. Уничтожено 20% химического оружия категории 1, как и было предусмотрено международными обязательствами. При этом на объекте «Горный» уже в декабре 2005 г. были уничтожены все имевшиеся запасы химического оружия в количестве 1143,2 т, на объекте «Камбарка» уничтожено 3206 т люизита, а на объекте «Марадыковский», который внёс наибольший вклад в выполнение второго этапа, – 3692 т ОВ типа ви-икс.

III этап Программы был досрочно выполнен в ноябре 2009 г. Уничтожено более 45% всех запасов химического оружия. В том числе: на объекте «Горный» – 1143,2 т, на объекте «Марадыковский» – 4779,3 т, на объекте «Камбарка» – 6349 т, на объекте «Леонидовка» – 4772,3 т, на объекте «Щучье» – 954,4 т [9, 10].

На IV завершающем этапе в 2015 г. на четырёх объектах по уничтожению химического оружия: «Марадыковский», «Леонидовка», «Почеп» и «Щучье» были полностью уничтожены собственные запасы химического оружия [11, 12].

Последним в декабре 2013 г. вступил в строй объект «Кизнер» в Удмуртской Республике. Здесь хранилось почти 5,8 тыс. т фосфорорганических ОВ и ОВ кожно-нарывного действия, снаряжённых в артиллерийские химические боеприпасы.

27 сентября 2017 г. на объекте «Кизнер», и соответственно в Российской Федерации, был уничтожен последний химический боеприпас.

В процессе уничтожения химического оружия не было зафиксировано ни одного случая поражений работающего персонала и населения, а также нанесения какого-либо ущерба окружающей среде.

Процесс уничтожения одного из видов оружия массового поражения является примером организации и решения масштабного международного проекта. В ходе выполнения Программы были решены сложнейшие научные, технические, организационные,

технологические, кадровые и иные проблемы. В требуемые Конвенцией сроки были построены семь объектов по безопасному хранению и уничтожению химического оружия, оснащённые современным автоматизированным, компьютеризированным и роботизированным оборудованием.

Были разработаны высокоэффективные отечественные технологии, которые позволили обеспечить безопасное уничтожение химических боеприпасов с соблюдением самых жёстких экологических стандартов и требований [13, 14].

Российская Федерация впервые в мировой практике сумела создать промышленные технологии уничтожения боеприпасов сложной конструкции, содержавшие не только ОВ, но и взрывчатые вещества, которые невозможно было извлечь. Соответствующие линии были введены в эксплуатацию на трёх объектах, на которых хранились подобные боеприпасы: «Леонидовка», «Марадыковский» и «Щучье» [15].

В промышленной зоне и в зоне защитных мероприятий объектов по уничтожению химического оружия были установлены уникальные специально разработанные приборы контроля качества атмосферного воздуха, воды, почв. Отслеживалось состояние флоры и фауны.

Развёрнутые медицинские службы, оснащённые новейшим оборудованием, пристально следили за здоровьем работающего персонала и местного населения.

С общественностью, представителями местных органов исполнительной власти, а также средств массовой информации со стороны госзаказчика Программы и Федерального управления проводился постоянный доверительный диалог.

Стоит отметить, что в рамках реализации президентской Программы не только безопасно уничтожены все ОВ, но и внесён огромный вклад в социально-экономическое развитие регионов расположения объектов по хранению и уничтожению химического оружия.

Все объекты социальной инфраструктуры, запланированные по Программе, были построены и сданы в эксплуатацию. В их числе более 400 многоквартирных жилых домов, 14 больниц, 22 детских общеобразовательных учреждения, 3 Дома культуры, 3 здания РОВД, 3 бани, Дворец водного спорта, 3 спортивных комплекса, 7 электроподстанций, 11 котельных, 2 полигона твёрдых бытовых отходов, водозаборное сооружение, пруд. Проложено 10,5 км сетей электроснабжения, 201 км сетей

водоснабжения, почти 30 км сетей теплоснабжения, 640 км сетей газоснабжения. Благоустроено более 50 км улиц, отремонтировано 160 км автомобильных дорог.

В регионах хранения и уничтожения химического оружия за прошедшие годы решены многие социальные вопросы, улучшилось качество жизни граждан, увеличилась численность населения, появились хорошо оплачиваемые рабочие места.

В местные и региональные бюджеты стали поступать дополнительные налоги, что в свою очередь также способствовало скорейшему решению социальных проблем, накопившихся в регионах.

27 сентября 2017 г. – **последний день уничтожения химического оружия**. На объекте «Кизнер» в Удмуртской Республике в торжественной обстановке было проведено завершение процесса уничтожения химического оружия в Российской Федерации.

В данном мероприятии приняли участие председатель Государственной комиссии по химическому разоружению, полномочный представитель Президента Российской Федерации в Приволжском федеральном округе М.В. Бабич, заместитель Министра промышленности и торговли Российской Федерации Г.В. Каламанов, начальник Федерального управления генерал-полковник В.П. Капашин, заместитель генерального директора Технического секретариата Организации по запрещению химического оружия (ОЗХО) Хамид Али Рао.

Председатель Государственной комиссии по химическому разоружению, полномочный представитель Президента Российской Федерации в Приволжском федеральном округе М.В. Бабич доложил Президенту Российской Федерации В.В. Путину в режиме телемоста о готовности досрочного уничтожения химического оружия в Российской Федерации (см. цв. вкладку).

О полной готовности к началу работ по уничтожению последнего химического боеприпаса в режиме телемоста Президенту Российской Федерации В.В. Путину доложил начальник Федерального управления по безопасному хранению и уничтожению химического оружия генерал-полковник В.П. Капашин.

Команду о начале процесса уничтожения последнего химического боеприпаса с ОВ дал Президент Российской Федерации.

Процедуру уничтожения химического боеприпаса комментировал начальник Феде-

рального управления. Последний боеприпас, а это был артиллерийский химический снаряд в наполнении ОВ типа ви-икс, поступил на уничтожение из специального хорошо защищённого технического помещения на поточную линию. Процесс был полностью автоматизирован и проходил без участия человека.

На автоматизированной линии боеприпас был подан на позицию узла вскрытия. Далее в корпусе боеприпаса с помощью специального сверла проделали отверстие. После рассверловки боеприпас переместился на позицию, где на отверстие было установлено кантующее эвакуационное устройство. На данной позиции осуществлялась эвакуация ОВ, для чего боеприпас был повернут вокруг своей оси отверстием вниз и ОВ из боеприпаса по трубопроводу поступило в реактор детоксикации. По завершении слива ОВ корпус боеприпаса вернули в исходное положение, в котором в него залили дегазирующий реагент. Подобная операция выполнялась дважды, а затем после очередного поворота корпуса отверстием вниз содержимое боеприпаса было эвакуировано в реактор детоксикации. Полученная реакционная масса по трубопроводу направилась на термическое обезвреживание, а пустой корпус боеприпаса подвергся термической обработке, и впоследствии – деформации.

После этого начальник Федерального управления генерал-полковник В.П. Капашин сообщил, что последний химический снаряд уничтожен.

Химического оружия на российской земле больше не стало.

Министр промышленности и торговли Российской Федерации Д.В. Мантуров доложил Президенту страны о том, как в дальнейшем предполагается использовать созданные здания, сооружения, инфраструктуру объектов по уничтожению химического оружия для решения задач хозяйственного значения. Он отметил: «Созданы семь объектов по уничтожению химического оружия, это современной инфраструктура. На это из федерального бюджета были потрачены миллиарды рублей. И мы были бы заинтересованы в использовании их в хозяйственном обороте».

Президент Российской Федерации согласился с докладом министра промышленности и торговли Российской Федерации и поручил ему подготовить соответствующие документы. Владимир Путин также поблагодарил всех тех, кто принимал участие в выполнении Программы и проявил при этом «высочайший профессионализм, ответственность, а порой и мужество».

На торжественном митинге, посвящённом уничтожению запасов химического оружия в Российской Федерации, который проходил на объекте «Кизнер», Глава Удмуртской Республики А.В. Бречалов обратил внимание, что реализуемый проект имел ещё одну важную грань – социальную. Выполнение Программы дало новое дыхание Камбарскому и Кизнерскому районам региона. «Существенные средства были потрачены на социальную инфраструктуру этих районов – дороги, газ, воду. Здесь созданы уникальные промышленные объекты, накоплены знания и опыт, которые способны ещё долго служить Удмуртии и России».

Стоит отметить слова председателя Государственной комиссии по химическому разоружению, полномочного представителя Президента Российской Федерации в Приволжском федеральном округе Михаила Викторовича Бабича, которые он произнёс в адрес начальника Федерального управления по безопасному хранению и уничтожению химического оружия. Он заметил: «Очень важно сказать о роли начальника Федерального управления, о роли командира. За эти годы Валерий Петрович Капашин создал уникальный коллектив. Он жил этой работой, он жил этой задачей. Он жил своим личным составом. Всё, о чём мы сегодня говорили, и об уничтожении химического оружия, и что не допущено никаких потерь и аварий, Валерий Петрович, это во многом Ваша заслуга. И Вам за это огромное отдельное спасибо».

В ходе реализации ФЦП «Уничтожение запасов химического оружия в Российской Федерации» Россия последовательно проводила курс на поддержку всех международных инициатив, направленных на всеобщее разоружение. Международному контролю российских объектов по хранению и уничтожению химического оружия всегда отводилась ключевая роль при выполнении обязательств по Конвенции. Инспекторы ОЗХО, следившие все эти годы за процессом уничтожения химического оружия, высоко оценили работу российских специалистов.

Полное и безопасное уничтожение Россией химического оружия официально подтверждено Организацией по запрещению химического оружия. ОЗХО выдала соответствующие сертификаты, которыми подтверждается факт уничтожения химического оружия на наших объектах.

В ОЗХО завершение процесса уничтожения химического оружия в Российской

## **В. Д. Назаров «Огромный шаг на пути к глобальной безопасности» (С. 4)**



Президент России В.В. Путин отдаёт приказ об уничтожении последнего химического боеприпаса и поздравляет коллектив Федерального управления с успешным выполнением поставленной боевой задачи



Председатель Государственной комиссии по химическому разоружению М.В. Бабич, начальник Федерального управления генерал-полковник В.П. Капашин и заместитель генерального директора технического секретариата ОЗХО Р. Х. Али докладывают Президенту России В.В. Путину о готовности подать на уничтожение последний российский химический боеприпас

**В. Д. Назаров «Огромный шаг на пути  
к глобальной безопасности» (С. 4)**



Генерал-полковник, профессор В.П. Капашин выступает с докладом, посвящённым уничтожению химического оружия в Российской Федерации



Почётную грамоту Верховного главнокомандующего коллективу Федерального управления М.В. Бабич вручает генерал-полковнику В.П. Капашину

Федерации назвали исторической вехой для международного сообщества. Хамид Али Рао, выступая на торжественном мероприятии в пос. Кизнер Удмуртской Республики, сказал: «В течение четырёх лет, когда работал объект «Кизнер», результаты были замечательными. ... России удалось соблюсти стандарты защиты населения и окружающей среды, а также этические обязательства и меры, закреплённые в международном праве. ... Фактически наша работа в России привела к разработке новых новаторских подходов. ... Россия была одной из первых стран, которая подписала Конвенцию и объявила о своих запасах химического оружия. ... Этот совместный успех также способствует укреплению положений Конвенции и свидетельствует о её эффективности в качестве оплота против химического оружия. Он также демонстрирует твёрдую приверженность России её вкладу в дело разоружения и нераспространения оружия».

Стоит отметить, что в реализации Программы нашей стране оказали техническую и финансовую помощь ряд государств: Германия, США, Швейцария, Нидерланды, Канада и другие страны. Эта помощь в совокупности составила около 10% от потраченных нашим государством средств.

Президент России подчеркнул, что мы хорошо понимаем те опасности и риски, которые могут вызывать возобновление гонки вооружений и попытки сломать стратегический паритет, и рассчитываем, что усилия России по ликвидации химического оружия послужат примером и для других стран.

Роль Федерального управления в ликвидации химического оружия неопределима. Благодаря деятельности этой организации сохранён престиж России как государства, выполняющего свои обязательства перед международным сообществом. То, что сделали военнослужащие и гражданский персонал Федерального управления, доказало, что Россия владеет передовыми научными технологиями и обладает главным богатством – людьми, которые способны сделать невозможное.

«Оглядываясь на пройденный путь, – сказал генерал-полковник В.П. Капашин, – думаю о том, как много значит доверие людей. Тех, кто рядом с тобой в одной упряжке, и тех, для блага которых наше государство пошло на огромные затраты, чтобы избавить народ от химической заразы. Доверие населения к нам, военным, крепло по мере того, как в регионах стали появляться объекты социального назначения: жильё, водопровод и канализация с

очистными сооружениями, газовые, тепловые и электрические сети, диагностические центры. Объекты оснащены самым современным оборудованием отечественного и зарубежного производства. Это огромный потенциал. Я уверен, что ему будет найдено достойное применение. А это значит, что у местного населения есть и будет, где работать, появится возможность зарабатывать и содержать свои семьи, растить и обучать своих детей».

Многолетний труд сотрудников Федерального управления был по достоинству оценен. За мужество и героизм, проявленные при уничтожении химического оружия, многие военнослужащие и гражданский персонал были награждены государственными наградами. Это является доказательством признания руководством страны высокого качества работы всего коллектива Федерального управления.

Блестяще выполненная, имеющая историческое значение работа Федерального управления останется в памяти потомков. В ознаменование полного завершения уничтожения запасов химического оружия в Брянской, Пензенской, Кировской и Курганской областях, а также в Удмуртской Республике были установлены памятные стелы.

Долгий и сложный путь пройден Российской Федерацией достойно и с честью. Сегодня мы с гордостью можем выразить благодарность российской науке, нашим учёным, проектировщикам, конструкторам, строителям и монтажникам, снабженцам и представителям других профессий, в первую очередь военным специалистам, благодаря усердию которых химическое оружие безвозвратно уничтожено. Труд специалистов Федерального управления, несомненно, является примером истинного героизма, мужества, беззаветного служения своему делу.

Химического оружия на российской земле больше нет! А современные, наукоёмкие, высокотехнологичные предприятия будут работать в мирных целях ещё не один год, принося экономическую пользу государству и регионам.

Дальнейшая работа объектов в мирных целях, связанных с производством конкурентоспособной продукции для различных областей промышленности, позволит сохранить богатейший производственный потенциал, квалифицированные кадры и будет способствовать развитию уникальной социальной инфраструктуры регионов. Ближайшая задача в этом плане связана с ликвидацией последствий деятельности объектов по уничтожению

химического оружия. Это комплекс работ по обеззараживанию и приведению в безопасное состояние зданий, сооружений и технологического оборудования, контактировавшего с отравляющими веществами, санации и рекультивации загрязнённых территорий. Нет сомнений, что в этих работах будет в полной мере задействован потенциал Федерального управления по безопасному хранению и уничтожению химического оружия, так как этот коллектив обладает в настоящее время высококлассными специалистами с большим практическим опытом в области организации и проведения особо опасных работ.

### Литература

1. «Конвенция о запрещении разработки, производства, накопления и применения химического оружия и о его уничтожении». Международная конференция по подписанию Конвенции. GE.92-61926, Париж, 1993. 133 с.
2. Федеральный закон от 5 ноября 1997 г. № 138-ФЗ «О ратификации Конвенции о запрещении разработки, производства, накопления и применения химического оружия и о его уничтожении» // Собрание законодательства Российской Федерации. 1997. № 45. Ст. 5138.
3. Постановление Правительства Российской Федерации от 21 марта 1996 г. № 305 «Об утверждении федеральной целевой программы «Уничтожение запасов химического оружия в Российской Федерации» // Собрание законодательства Российской Федерации. 1996. № 14. Ст. 1448.
4. Указ Президента Российской Федерации от 13 апреля 1996 г. № 542 «О присвоении федеральной целевой программе «Уничтожение запасов химического оружия в Российской Федерации» статуса президентской программы» // Собрание законодательства Российской Федерации. 1996. № 16. Ст. 1841.
5. Указ Президента Российской Федерации от 26 апреля 2001 г. № 487 «О Государственной комиссии по химическому разоружению» // Собрание законодательства Российской Федерации. 2001. № 18. Ст. 1828.
6. Распоряжение Правительства Российской Федерации от 21 ноября 2000 г. № 1644-р «О государственном заказе работ по уничтожению химического оружия, ликвидации или конверсии объектов по уничтожению химического оружия» // Собрание законодательства Российской Федерации. 2000. № 48. Ст. 4727.
7. Постановление Правительства Российской Федерации от 5 февраля 2001 г. № 87 «О Федеральном управлении по безопасному хранению и уничтожению химического оружия при Федеральном агентстве по промышленности» // Собрание законодательства Российской Федерации. 2001. № 7. Ст. 665.

8. Постановление Правительства Российской Федерации от 15 ноября 2006 г. № 690 «О внесении изменений в постановление Правительства Российской Федерации от 5 февраля 2001 г. № 87» // Собрание законодательства Российской Федерации. 2006. № 47. Ст. 4920.

9. Kholstov V.I. Chemical weapons decommission – the 3d stage // *Teoreticheskaya i prikladnaya ekologiya*. 2010. No. 1. P. 12–18.

10. Холстов В.И. Реализация Федеральной целевой программы на четвёртом, заключительном, этапе уничтожения химического оружия // *Теоретическая и прикладная экология*. 2012. № 4. С. 6–7.

11. Капашин В.П. Актуальные вопросы завершающего четвёртого этапа выполнения конвенционных обязательств Российской Федерацией // *Теоретическая и прикладная экология*. 2012. № 4. С. 8–9.

12. Капашин В.П., Холстов В.И., Кондратьев В.Б. 20 лет со дня принятия федеральной целевой программы «Уничтожение запасов химического оружия в Российской Федерации» // *Теоретическая и прикладная экология*. 2016. № 4. С. 6–11.

13. Капашин В.П. Уничтожение запасов химического оружия на основе современных российских технологий // *Теоретическая и прикладная экология*. 2015. № 3. С. 10–13.

14. Холстов В.И. Реализация научно-технической политики в области уничтожения химического оружия в Российской Федерации // *Теоретическая и прикладная экология*. 2011. № 4. С. 5–7.

15. Капашин В.П., Холстов В.И., Мандыч В.Г., Кармишин А.Ю., Коваленко И.В., Краснянский А.И. Безопасный процесс уничтожения боеприпасов сложной конструкции – от концепции до технологии // *Теоретическая и прикладная экология*. 2015. № 3. С. 29–34.

### References

1. “Convention on prohibition of development, production, stockpiling and use of chemical weapons and on their destruction”. International conference for signing a Convention. GE.9261926, Paris, 1993. 133 p. (in Russian).
2. Federal law of 5 November 1997, № 138FZ “On ratification of the Convention on prohibition of development, production, stockpiling and use of chemical weapons and on their destruction” // *Collected legislation of the Russian Federation*. 1997. No. 45. St. 5138 (in Russian).
3. Resolution of the Government of the Russian Federation of March 21, 1996 № 305 “On approval of Federal target programme “Destruction of chemical weapons stockpiles in the Russian Federation” // *Collected legislation of the Russian Federation*. 1996. No. 14. St. 1448 (in Russian).
4. The decree of the President of the Russian Federation, April 13, 1996 № 542 “On assignment of the status of a presidential program to the Federal target program “Destruction of chemical weapons stockpiles in the Rus-

sian Federation” // Collected legislation of the Russian Federation. 1996. No. 16. St. 1841 (in Russian).

5. The decree of the President of the Russian Federation of April 26, 2001, № 487 “On the State Commission of chemical disarmament” // Collected legislation of the Russian Federation. 2001. No. 18. St. 1828 (in Russian).

6. The government of the Russian Federation of 21 November 2000 No. 1644R “On the state customer of works in chemical weapons destruction, liquidation or conversion of chemical weapons destruction plants” // Collected legislation of the Russian Federation. 2000. No. 48. St. 4727 (in Russian).

7. Resolution of the Government of the Russian Federation, February 5, 2001 № 87 “On the Federal Directorate for chemical weapons safe storage and destruction at the Federal Agency for industry” // Collected legislation of the Russian Federation. 2001. No. 7. St. 665 (in Russian).

8. Resolution of the Government of the Russian Federation of November 15, 2006 № 690 “On amendments to resolution of the Government of the Russian Federation of February 5, 2001 № 87” // Collected legislation of the Russian Federation. 2006. No. 47. St. 4920 (in Russian).

9. Kholstov V.I. Chemical weapons decommission – the 3d stage // *Teoreticheskaya i prikladnaya ekologiya*. 2010. No. 1. P. 12–18.

10. Kholstov V.I. Implementation of the federal target program at the fourth, final stage of chemical weapons decommission // *Teoreticheskaya i prikladnaya ekologiya*. 2012. No. 4. P. 6–7 (in Russian).

11. Kapashin V.P. Topical issues of the fourth, final stage of fulfilling Convention obligations by the Russian Federation // *Teoreticheskaya i prikladnaya ekologiya*. 2012. No. 4. P. 8–9 (in Russian).

12. Kapashin V.P., Kholstov V.I., Kondratiev V.B. Results of the federal target program “Destruction of chemical weapons stockpiles in the Russian Federation” on the eve of 2014 // *Teoreticheskaya i prikladnaya ekologiya*. 2016. No. 4. P. 6–11 (in Russian).

13. Kapashin V.P. Decommission of chemical weapons stores using contemporary techniques worked out in Russia // *Teoreticheskaya i prikladnaya ekologiya*. 2015. No. 3. P. 10–13 (in Russian).

14. Kholstov V.I. Implementation of science and technology policy in the sphere of chemical weapon destruction in the Russian Federation // *Teoreticheskaya i prikladnaya ekologiya*. 2011. No. 4. P. 5–7 (in Russian).

15. Kapashin V.P., Kholstov V.I., Mandich V.G., Karmishin A.Yu., Kovalenko I.V., Krasnyansky A.I. Secure process of destructing complex construction ammunition from concept to technology // *Teoreticheskaya i prikladnaya ekologiya*. 2015. No. 3. P. 29–34 (in Russian).

## Биосенсоры для осуществления мероприятий экологического мониторинга: классификация и особенности разработки

© 2017. Д. Л. Поклонский<sup>1</sup>, д. т. н., заместитель начальника,  
 О. Ю. Дурилов<sup>1</sup>, заместитель начальника,  
 Д. А. Зыгин<sup>1</sup>, к. х. н., начальник отдела,  
 В. А. Воронин<sup>2</sup>, к. т. н., начальник,  
 А. Ю. Исаева<sup>2</sup>, к. б. н., н. с., Н. В. Ермилов<sup>1</sup>, м. н. с.,

<sup>1</sup>Научно-исследовательский центр Федерального государственного бюджетного учреждения «48 научно-исследовательский институт» Министерства обороны Российской Федерации, 141306, Россия, Московская обл., г. Сергиев Посад, 6,

<sup>2</sup>Научно-исследовательский центр Федерального управления по безопасному хранению и уничтожению химического оружия 115487, Россия, г. Москва, ул. Садовники, 4-а, e-mail: fubhuho@mail.ru

Несколько способов классификации биосенсоров являются ключевыми в данной работе: по способу детектирования целевого анализата; по типу используемых биорецепторов; по механизму преобразования сигнала. Рассмотрены основные классы биосенсорных систем. Изложены основные подходы и особенности их разработки. В статье отмечено, что биосенсорные системы используются в различных сферах деятельности, поэтому актуальной проблемой для различных отраслей пищевой промышленности, клинической медицины и экологии являются мероприятия экологического и санитарно-эпидемиологического мониторинга. Основные усилия разработчиков биосенсорных систем направлены на интеграцию биосенсоров в уже сложившуюся систему детектирования возбудителей инфекционных заболеваний, которая традиционно включает методы полимеразной цепной реакции (ПЦР), методы подсчёта колоний микроорганизмов и иммунологические методы. В статье разобраны основные типы биосенсоров и выявлены их преимущества и недостатки. Рассмотрены и показаны перспективы использования данных сенсоров для решения задач экологического и биологического контроля. В работе подчёркивается, что аналитические возможности биосенсорных систем достаточно обширны, и это открывает новые возможности для их применения при проведении комплексных наблюдений за состоянием окружающей среды, в том числе компонентов природной среды, естественных экологических систем, за происходящими в них процессами, явлениями, а также оценка и прогноз изменений окружающей среды.

*Ключевые слова:* биосенсорная система, экологический мониторинг, иммобилизация биомолекул, целевой анализ.

## Biosensors for environmental monitoring activities: classification and design features

D. L. Poklonsky<sup>1</sup>, O. Yu. Durilov<sup>1</sup>, D.A. Zygin<sup>1</sup>,  
 V.A. Voronin<sup>2</sup>, A. Yu. Isaeva<sup>2</sup>, N. V. Ermilov<sup>1</sup>,

<sup>1</sup>Scientific Research Center of the Federal budgetary institution “48 Research Institute” of Ministry of Defense of the Russian Federation, 6 Sergiev Posad, Moscow region, Russia, 141306,

<sup>2</sup>Research and Development center of the Federal Directorate for Safe Storage and Destruction of Chemical Weapons, 4a St. Sadovniki, Moscow, Russia, 115487, e-mail: fubhuho@mail.ru

The article considers the basic requirements for biosensors. Their classification for implementation of measures aimed at preventing, detecting, and suppressing legislation violation in the field of environmental protection, ensuring compliance with requirements of economic and other activities, including standards and regulatory documents, is given. Several ways of classifying biosensors are keystone in this work: by the method of detecting the target analyte; by the type

of bioreceptors used; on the mechanism of signal conversion. The main classes of biosensor systems are also considered. The main approaches and features of their development are outlined. The article notes that biosensor systems are used in various fields of activity, therefore, an urgent problem for various branches of the food industry, clinical medicine, and ecology are measures of ecological and sanitary-epidemiological monitoring. The main efforts of developers of biosensor systems are aimed at integrating biosensors into the already established system of detecting pathogens of infectious diseases, which traditionally includes technique of polymerase chain reaction (PCR), methods of counting microorganism colonies, and immunological methods. The main types of biosensors are analyzed in the article and their advantages and disadvantages are revealed. The prospects of using these sensors for solving environmental and biological control problems are considered and shown. The work emphasizes that the analytical capabilities of biosensor systems are quite extensive, and this undoubtedly opens up new possibilities for their application in carrying out complex observations of the state of the environment, including components of the natural environment, natural ecological systems, processes occurring in them, phenomena, and also assessment and forecast of environmental changes.

**Keywords:** biosensory system, ecological monitoring, immobilization of biomolecules, target analyte.

Сенсором называется устройство, преобразующее информацию о наличии специфического химического соединения (аналита) в удобный для преобразования (детектируемый) сигнал.

В общем случае сенсор содержит два компонента – рецепторную систему химического распознавания (рецептор) и преобразователь сигнала (трансдьюсер), основанный на химическом или физическом принципе.

Таким образом, биосенсоры – это вид сенсоров, в которых система распознавания имеет биохимическую природу и основана на реакциях с участием биомолекул либо надмолекулярных биологических структур [1]. В биосенсорах система распознавания находится в непосредственном контакте с преобразователем сигнала (рис. 1) [1, 2].

Одним из главных требований, предъявляемых к биосенсорам, является селективность биорецептора к специфичному целевому аналиту и способность сохранять

селективность при наличии других веществ в пробе [3]. Селективность зависит от способности биорецептора связываться с аналитом. Высокоселективные системы биологического распознавания разрабатываются с использованием биорецепторов биологического происхождения (антитела, лиганды и др.) или созданных по образу биологических систем (искусственные распознающие элементы: аптамеры, пептиды, полимеры, полученные методом молекулярной печати) [4]. Другое важное требование, предъявляемое к биосенсорам, – чувствительность. Чувствительность зависит от множества факторов, включая геометрию сенсорной (чувствительной) поверхности [5], свойств материала сенсора [6], химических свойств поверхности, используемой для иммобилизации биорецепторов [7, 8].

При классификации важно разделять биосенсоры и аналитические системы, требующие дополнительные стадии пробоподготовки и

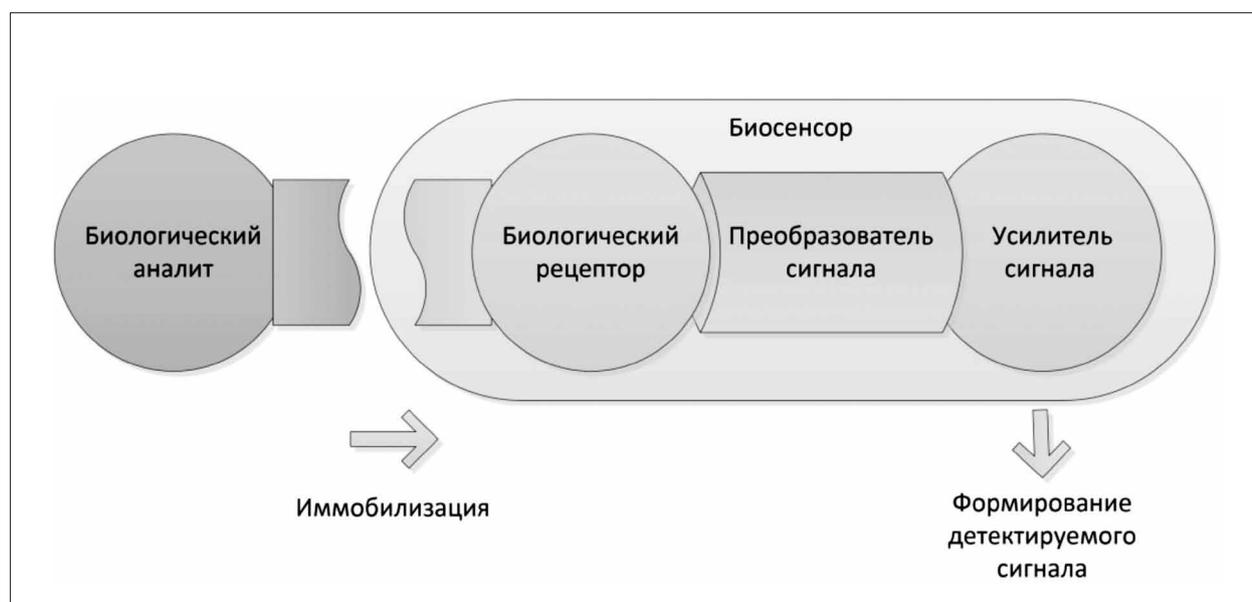


Рис. 1. Принципиальная схема биосенсора

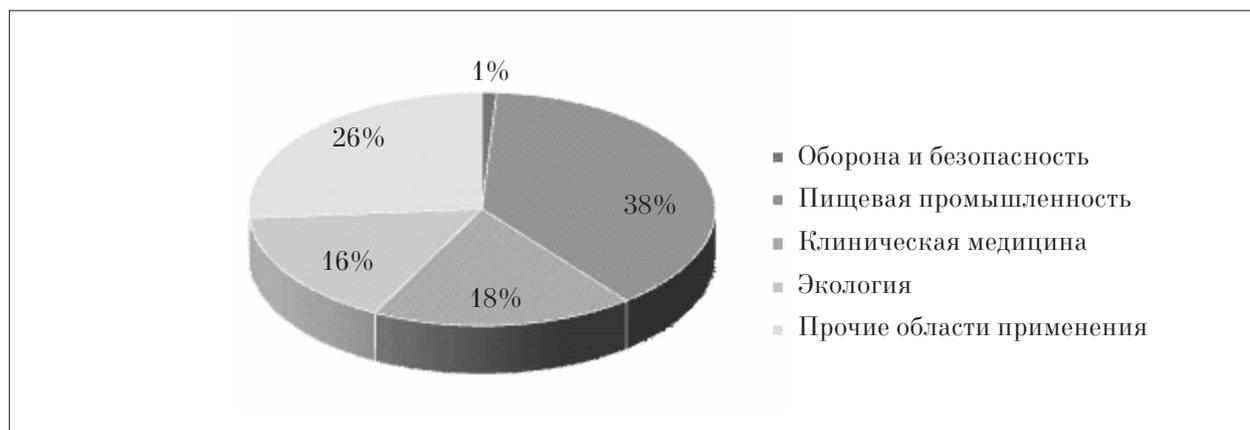


Рис. 2. Использование биосенсорных систем в различных сферах деятельности

разделения пробы (различные виды хроматографии, проточная цитометрия и пр.) [1].

Часто даже в специализированной литературе термины «биосенсор» и «биочип» используются как синонимы, при этом в отличие от общепринятого определения биосенсора, в определение «биочип» многие исследователи вносят своё понимание этой системы. В целом в качестве биочипов можно рассматривать биосенсоры, выполненные по технологиям микроэлектроники и использующиеся для доставки, обработки, анализа или обнаружения биологических молекул и объектов [9].

### Биосенсоры как технические системы. Проблемы выявления аналитов в пробах окружающей среды и клинических образцах

Проведение мероприятий экологического и санитарно-эпидемиологического мониторинга является актуальной проблемой для различных отраслей пищевой промышленности, клинической медицины и экологии (рис. 2) [10].

В настоящее время усилия разработчиков биосенсорных систем направлены на интеграцию биосенсоров в сложившуюся систему детектирования возбудителей инфекционных заболеваний, традиционно включающую методы полимеразной цепной реакции (ПЦР), методы подсчёта колоний микроорганизмов и иммунологические методы.

Методы подсчёта колоний микроорганизмов и культуральные методы продолжают оставаться стандартом для микробиологических исследований, несмотря на их трудоёмкость и длительность получения результата. Так, в случае специфического анализа на *Campylobacter* spp. время получения отрицательного результата составляет 4–9 дней, а для подтверждения

положительного результата необходимо ждать 14–16 дней [11]. Как правило, такие сроки неприемлемы для клинических исследований и анализа в различных отраслях промышленности. Для дифференциальной диагностики патогенных микроорганизмов используют селективные среды культивирования. Подобные среды могут содержать ингибиторы для подавления роста нецелевых видов микроорганизмов или специфические субстраты, подходящие для роста определённых микробов (например, радужный агар для выявления *Salmonella* spp.) [12]. Анализ осуществляется с помощью оптических методов и визуального осмотра колоний.

Иммунологические методы остаются одним из наиболее мощных аналитических инструментов обнаружения микроорганизмов при решении различных задач. Помимо традиционных методов (реакция геммагглютинации, иммуноферментный анализ, различные варианты иммунохроматографии) в арсенале современных иммунологических методов находится иммуномагнитная сепарация (IMS), комбинируемая с различными методами детектирования [13].

Полимеразная цепная реакция основана на технологии амплификации нуклеиновых кислот, которая была предложена в середине 80-х гг. XX века. Технология базируется на выделении, амплификации и определении количества копий коротких фрагментов ДНК, содержащихся в геноме выявляемого микроорганизма. В настоящее время существуют различные варианты постановки амплификационного анализа: ПЦР в реальном времени (ПЦР-РВ), мультиплексная ПЦР (мПЦР), ПЦР с обратной транскрипцией (ОТ-ПЦР) [14–16].

Существует несколько классов биологических рецепторов, которые используются в

биосенсорных системах. Основными классами рецепторов являются ферменты, антитела и нуклеиновые кислоты. При этом в ходе обнаружения возбудителей инфекционных заболеваний прослеживается тенденция использования ферментов преимущественно в качестве меток, а не специфических элементов распознавания бактерий [10]. Ферменты используются для маркировки антител и ДНК-зондов, как это имеет место в ходе традиционного иммуноферментного анализа. Большая часть коммерчески доступных биосенсоров содержит в своём составе маркированные ферментами антитела. В зависимости от способа получения антитела классифицируются на моноклональные, поликлональные и рекомбинантные. От класса, к которому относятся антитела, зависит также их селективность.

**Основные типы биосенсоров, их преимущества и недостатки**

Существует несколько способов классификации биосенсоров: по способу детектирования целевого аналита; по типу используемых биорецепторов; по механизму преобразования сигнала.

В настоящее время используются две группы способов детектирования целевого аналита: с использованием специальных меток и красителей (label-based); без использования специальных меток и красителей (label-free). Перечень методов детектирования, которые могут использоваться для обоих случаев, представлен в таблице 1. В зависимости от природы сигнала и механизма его преобразования биосенсоры можно классифицировать на следующие группы: механические; опти-

**Таблица 1**

Классификация биосенсоров в зависимости от наличия специальных меток и красителей

Детектирование с меткой	Безметочное детектирование		
	оптическое	механическое	электрическое
– ELISA; – FRET; – использование квантовых точек	– поверхностный плазмонный резонанс; – интерферометрия; – эллипсометрия; – метод резонансного зеркала	– использование кантилевера; – использование наномеханического осциллятора; – метод микробаланса кварцевого кристалла	– использование полевых транзисторов (ISFET, EnFET, HFET, NanowireFET); – использование микрофлюидных электрохимических устройств ( $\mu$ PED)

**Таблица 2**

Классификация биосенсоров в зависимости от способа преобразования сигнала и используемых методов детектирования [8]

Механизм преобразования	Метод
Механический	– изменение/определение поверхностного напряжения – изменение/определение массы – изменение/определение резонансной частоты
Оптический	– флуоресценция – хемолюминесценция – биолюминесценция – поверхностный плазмонный резонанс – рассеивание – интерферометрия затухающих волн
Электрический	– определение проводимости – определение ёмкости – определение сопротивления
Пьезоэлектрический	– микробаланс кварцевого кристалла (QCM) – поверхностная акустическая волна
Электрохимический	– потенциометрия – вольтамперометрия – использование ион-селективного полевого транзистора (ISFET) – использование химически чувствительного полевого транзистора (ChemFET)
Термальный	– калориметрия

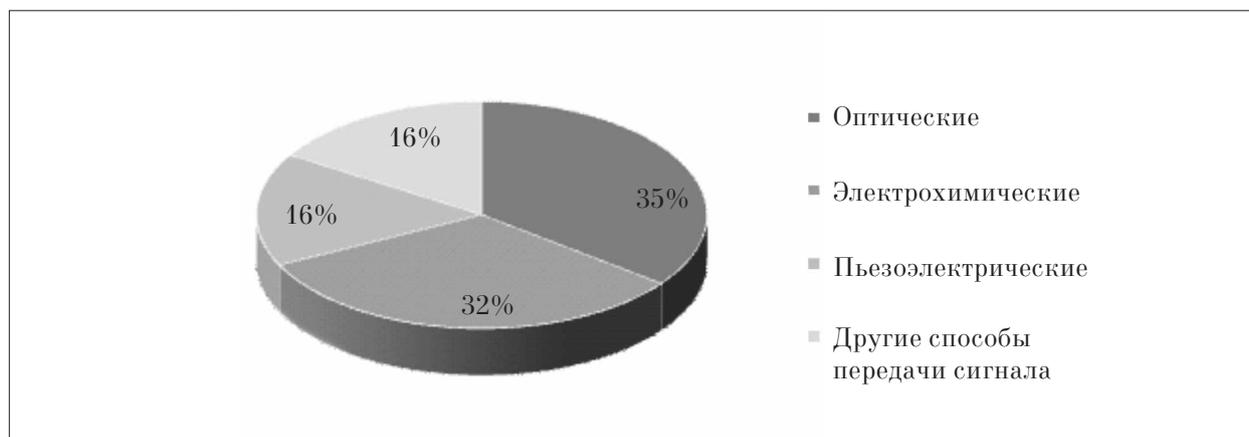


Рис. 3. Способы преобразования сигнала, используемые в конструкциях биосенсоров

Таблица 3

Классификация биосенсоров в зависимости от типа рецептора

Рецептор	Тип биосенсора
Фермент	Аффинный / Каталитический
Антитело / Антиген	Аффинный (иммуносенсор)
Нуклеиновые кислоты / ДНК	Каталитический
Искусственный (синтетические) биоматериал	Аффинный
Клеточные структуры / Клетки	Каталитический
Ионофор	Аффинный

ческие; электрические; пьезоэлектрические; электрохимические; термальные (табл. 2).

*Электрические и электрохимические биосенсоры* основаны на измерении электрических величин, которые изменяются в системе при взаимодействии между рецептором и аналитом.

*Потенциометрические* сенсоры формируют аналитический сигнал как разность потенциалов между рабочим электродом и электродом сравнения, иммобилизованными в полупроницаемую мембрану. При этом ион-селективный электрод (ISE) используется в качестве преобразователя/усилителя сигнала. Наиболее распространённый тип потенциометрических сенсоров – это pH-электроды [17].

*Вольтамперометрические* сенсоры позволяют осуществлять обнаружение аналитов, участвующих в окислительно-восстановительных реакциях. Между рабочим электродом и электродом сравнения устанавливается фиксированная величина разности потенциалов, после чего осуществляют контроль за изменением напряжения в цепи, которое пропорционально концентрации одного из продуктов аналитической реакции [18].

*Кондуктометрические* сенсоры осуществляют измерение проводимости раствора в

ходе протекания аналитической реакции. Кондуктометрические сенсоры мало пригодны для использования в каталитических реакциях, но широко применяются в реакциях, где осуществляются аффинные взаимодействия.

*Импедансные* сенсоры основаны на измерении сопротивления в электрохимической ячейке или на фиксировании изменения сопротивления при варьировании вольтамперметрических характеристик [2].

*Сенсоры на основе полевых транзисторов* основаны на использовании ион-селективных электродов в традиционных потенциометрических системах, при этом входной транзисторный элемент помещается в анализируемый раствор. Это существенно повышает разрешающую способность и улучшает аналитические возможности биосенсора. Чувствительный слой биосенсора располагается непосредственно на поверхности ион-селективного электрода, представляя собой ворота полевого транзистора. Использование подобных биосенсоров даёт возможность непосредственного обнаружения коротких белков и пептидов по величине их заряда [19].

Существенным ограничением при использовании электрических и электрохимиче-

ских биосенсоров является чувствительность аналитических систем к буферной ёмкости раствора.

В коммерчески доступных биосенсорных системах для выявления возбудителей инфекционных заболеваний наибольшее распространение получили биосенсоры на основе оптических и электрохимических методов (рис. 3) [10].

Биосенсоры можно классифицировать на два типа в зависимости от биорецептора (табл. 3): аффинные и каталитические. Аффинные рецепторы не влияют или не изменяют целевой аналит (биомаркер), в то время как каталитические рецепторы катализируют биохимическую реакцию. Большинство ферментов относятся к каталитическим рецепторам. В случаях, когда ферменты не дают возможности обнаружить требуемые биомолекулы, прибегают к использованию антител, как высоко селективных рецепторов.

Наиболее широко используемыми биорецепторами являются: антитела; ферменты; нуклеиновые кислоты; искусственные (синтетические) биораспознающие элементы.

Для формирования аналитического сигнала в биосенсорах используют такие методы иммо-

билизации биологического аналита, как физическая адсорбция [10], ковалентное связывание [11], встраивание в матрицу [12], перекрёстное межмолекулярное связывание [13], мембранное связывание [14] и инкапсулирование [15], как это представлено на рисунке 4.

*Физическая адсорбция* основана на совместном действии Ван-дер-Ваальсовых, гидрофобных, водородных и ионных сил, вызывающих прикрепление биологического рецептора к поверхности сенсора. Для иммобилизации биомолекул широко используются подложки из целлюлозы, стекла, гидроксипатита и коллагена. Хотя реализация метода физической адсорбции довольно проста, образующееся взаимодействие является слабым и биомолекула с лёгкостью отделяется от подложки.

*Ковалентное связывание* предполагает модификацию поверхности сенсора, в результате которой образуются активные группы, способные эффективно связываться с рецепторными молекулами. В случае, когда рецептором биосенсора выступает фермент, иммобилизация осуществляется через функциональные группы, которые не являются существенными для ферментативной активности. Как пра-

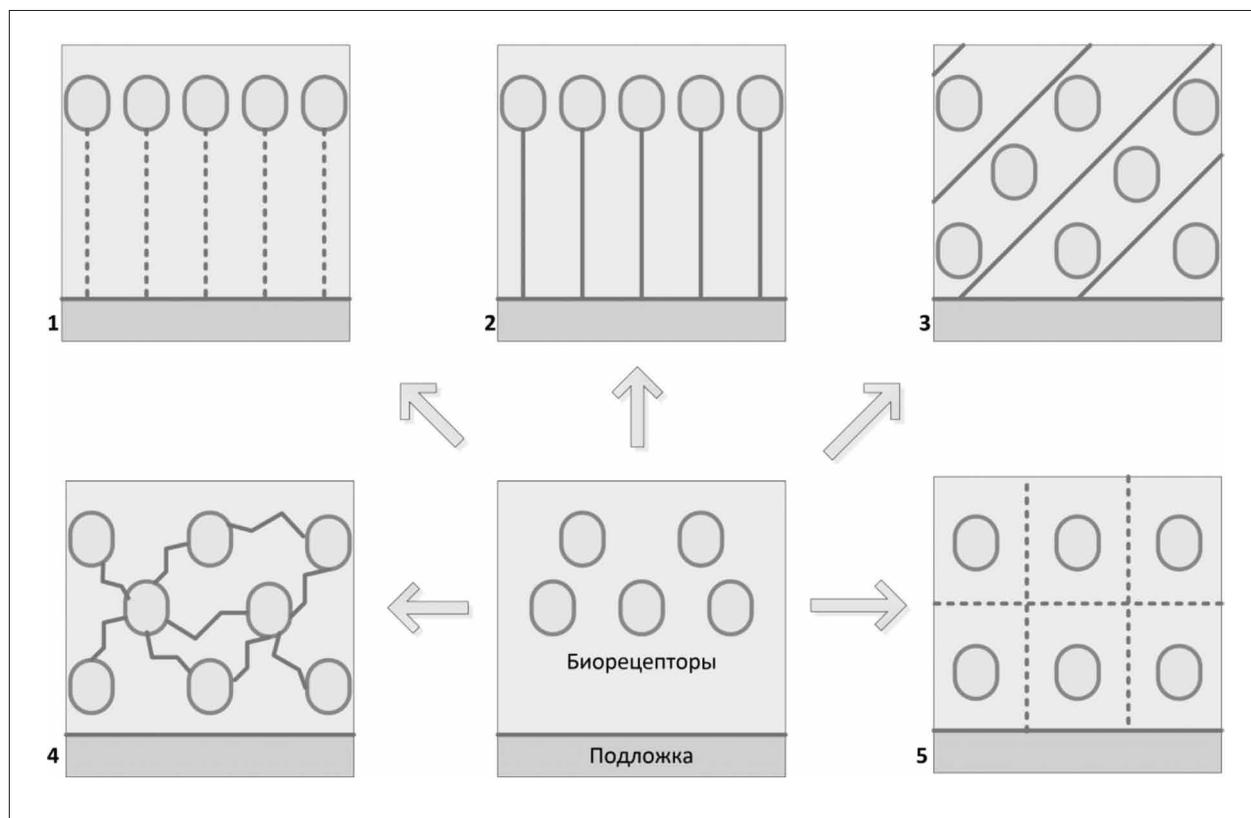


Рис. 4. Способы иммобилизации биорецепторов в подложке

1 – физическая адсорбция; 2 – ковалентное связывание; 3 – встраивание в матрицу из полимерного геля; 4 – перекрёстное межмолекулярное взаимодействие; 5 – инкапсулирование в пористую матрицу

вило, это нуклеофильные группы (амино-, карбоксильные, имидазольные, тиольные, гидроксильные). Ковалентное связывание позволяет решить проблемы нестабильности биомолекул, агрегации и диффузии, что даёт возможность получать биосенсоры с хорошими показателями плотности и равномерности распределения биорецепторов на поверхности сенсора.

*Встраивание в матрицу* из полимерного геля также позволяет закрепить биорецепторы на подложках. Для реализации данного способа подходят гелевые матрицы, содержащие полиакриламид, крахмал, поливинилловый спирт, поливинилхлорид, поликарбонаты, ацетат целлюлозы и силикагель. Со временем происходит вымывание биорецепторов из матрицы, что сопровождается снижением сенсорной активности.

*Перекрестное межмолекулярное взаимодействие* биомолекул с бифункциональными и мультифункциональными реагентами, такими, как глутаровый альдегид, гексаметилендиизоцианат, 1,5-дифтор-2,4-динитробензол также используется для иммобилизации рецепторов на поверхности биосенсора. Недостатком данного способа является то, что образуемый активный участок является неоднородным и может включать несколько рецепторных слоев, образующих диффузионный барьер.

*Инкапсулирование* в пористую матрицу осуществляется с использованием системы «золь-гель». В качестве пористой матрицы используется оксид кремния, который даёт возможность использования оптических методов визуализации сигналов с поверхности биосенсора. Процессы в системе «золь-гель» протекают при комнатной температуре, что предотвращает денатурацию биомолекул, а образующиеся структуры обладают высокой стабильностью.

Иммобилизация биомолекул на поверхности является одним из ключевых этапов создания биосенсоров, в ходе которого необходимо учитывать целый ряд эксплуатационных требований. Это обеспечение функциональной активности и стабильности биомолекул, предотвращение химической инактивации. В связи с этим не существует универсальной стратегии иммобилизации и её приходится подбирать индивидуально с учётом особенностей биорецептора, матрицы, преобразователя сигнала и свойств пробы, которую предполагается анализировать.

При создании биосенсоров для выявления патогенных микроорганизмов наибольшее

распространение получили следующие способы иммобилизации рецептора [16–19].

*Адсорбция на поверхности золота* – является достаточно простым и быстрым способом иммобилизации, который предполагает прикрепление антител к субстрату в случайном порядке, без направленного пространственного ориентирования. Так как адсорбция рецепторов на поверхности золота является неспецифической, аналитические характеристики сенсора редко бывают высокими.

*Авидин-биотиновые системы* – позволяют быстро и надёжно прикрепить биорецепторы к покрытой авидином поверхности. Хотя константа аффинного взаимодействия между авидином и биотином является довольно высокой ( $10^{-15}$  моль $^{-1}$  · л), само взаимодействие имеет нековалентную природу, что позволяет осуществлять множественную отмывку поверхности сенсора и использовать его повторно. К числу недостатков авидин-биотиновых систем относят высокую стоимость реагентов [20].

Монослойные структуры, способные к самосборке (self-assembled monolayers – SAMs), получают при эмульгировании плоских микрочастиц золота в растворителе в присутствии поверхностно-активных веществ (ПАВ). Наибольшее распространение в качестве растворителя получили системы на основе этанола с добавками дисульфидов или тиолов [21]. Формирование и взаимодействие монослоёв осуществляется при реакции радикалов с сульфидными группами. Присоединение биорецептора происходит посредством тиольной группы.

Таким образом, аналитические возможности биосенсорных систем достаточно широки, что открывает возможности для их применения при проведении мероприятий экологического мониторинга.

## References

1. Karyakin A.A., Ulasova E.A., Vagin M.Yu., Karyakina E.E. Biosensors: device, classification and functional characteristics // Sensor. 2012. No. 1. P. 16–23 (in Russian).
- [Карякин А.А., Уласова Е.А., Вагин М.Ю., Карякина Е.Е. Биосенсоры: устройство, классификация и функциональные характеристики // Сенсор. 2012. № 1. С. 16–23].
2. Turner A.P.F., Karube I., Wilson G.S. Biosensors, fundamentals and applications // Oxford University Press, 1987. 770 p.
3. Collings A., Caruso F. Biosensors: recent advances // Rep. Prog. Phys. 1997. No. 60. P. 1397–1445.

4. Tamerler C., Sarikaya M. Molecular biomimetics: nanotechnology and bionanotechnology using genetically engineered peptides // *Phil. Trans. R. Soc. A*. 2009. V. 367. P. 1705–1726.
5. Ansari M., Cho C. Deflection, frequency, and stress characteristics of rectangular, triangular, and step profile microcantilevers for biosensors // *Sensors*. 2009. No. 9. P. 6046–6057.
6. Vasan A., Doraiswami R., Pecht M. Biocompatible polymer composite material for highly sensitive point-of-care bioMEMS microcantilever sensors // *Surface Mount Technology Association: SMTA International Conference*. 2010. V. 1. P. 17–26.
7. Zammattéo N., Jeanmart L., Hamels S., Courtois S., Louette P., Hevesi L., Remacle J. Comparison between different strategies of covalent attachment of DNA to glass surfaces to build DNA microarrays // *Anal. Biochem*. 2000. No. 280. P. 143–150.
8. Vasan A., Doraiswami R., Mahadeo D. Point-of-care biosensor systems // *Frontiers in Bioscience*. 2013. S. 5. P. 39–71.
9. Bashir R. Introduction to bio-chip, biosensors, bioMEMS. Laboratory of Integrated Biomedical Micro/Nanotechnology and Applications (LIBNA), School of Electrical and Computer Engineering, Department of Biomedical Engineering, Purdue University, West Lafayette, Indiana [Internet resource] <http://www.ece.purdue.edu/bashir> (Accessed: 12.10.2017).
10. Lazcka O., Del Campo F.J., Munoz F.X. Pathogen Detection: A perspective of traditional methods and biosensors // *Biosens. Bioelectron*. 2007. No. 22. P. 1205–1217.
11. Brooks B.W., Devenish J., Lutze-Wallace C.L., Milnes D., Robertson R.H., Berlie-Surujoballi G. Evaluation of a monoclonal antibody-based enzyme-linked immunosorbent assay for detection of *Campylobacter fetus* in bovine preputial // *Vet. Microbiol*. 2004. V. 103. P. 77–84.
12. Fratamico P.M. Comparison of culture, polymerase chain reaction (PCR), TaqMan Salmonella, and Transia Card Salmonella assays for detection of *Salmonella* spp. in naturally-contaminated ground // *Mol. Cell Probes*. 2003. V. 17. P. 215–221.
13. Gu H., Xu K., Xu C. Biofunctional magnetic nanoparticles for protein separation and pathogen detection // *Chem. Commun*. 2006. P. 941–949.
14. Hunt M. Real time PCR tutorial – Copyright 2006, the board of trustees of the University of South Carolina // *Nucleic Acids Research*. 1998. V. 26. P. 2150–2155.
15. Hayden M.J., Nguyen T.M., Waterman A., Chalmers K.J. Multiplex-ready PCR: a new method for multiplexed SSR and SNP genotyping // *BMC Genomics*. 2008. No. 9:80. P. 1–12.
16. Bustin S.A., Benes V., Nolan T., Pfaffl M.W. Quantitative real-time RT-PCR. A perspective // *J. Mol. Endocrinol*. 2005. No. 34 (3). P. 597–601.
17. Korotkaya E.V. Biosensors: Design, classification and applications in the food industry // *Foods and Row Mat*. 2014. V. 2. No. 2. P. 161–171.
18. Karyakin A.A., Ulasova E.A., Vagin M. Yu., Karyakina E.E. Biosensors: design, classification and functional characteristics // *Sensor*. 2002. No. 1. P. 16–24.
19. Lud S.Q., Nikolaides M.G., Haase I., Fischer M., Bausch A.R. Field effect of screened charges: electrical detection of peptides and proteins by a thin film resistor // *Chem. Phys. Chem*. 2006. V. 7. No. 2. P. 379–384.
20. Tombelli, S., Mascini, M., Piezoelectric quartz crystal biosensors: recent immobilization schemes // *Anal. Lett*. 20006. No. 33 (11). P. 2129–2151.
21. Su X.-L., Li Y. A nanoparticle amplification based quartz crystal microbalance DNA sensor for detection of *Escherichia coli* O157:H7 // *Biosens. Bioelectron*. 2004. No. 19. P. 563–574.

## Химические основы методик определения массовой доли основного вещества в стандартных образцах состава зарина и зомана

© 2017. С. Н. Кобцов<sup>2</sup>, к. х. н., н. с., И. Х. Ильясов<sup>2</sup>, к. х. н., с. н. с.,  
И. Н. Исаев<sup>1</sup>, к. х. н., доцент, начальник управления,  
Д. О. Веткин<sup>2</sup>, к. х. н., с. н. с., Е. В. Четырина<sup>2</sup>, н. с., Е. В. Максимова<sup>2</sup>, м. н. с.,

<sup>1</sup> Научно-исследовательский центр Федерального управления  
по безопасному хранению и уничтожению химического оружия  
119160, Россия, г. Москва, ул. Садовники, 4-а,

<sup>2</sup> Филиал «Войсковая часть 21222» Федерального бюджетного  
учреждения – войсковая часть 70855,  
440520, Россия, Пензенская область, Леонидовка,  
e-mail: fubhuho@mail.ru

После завершения уничтожения запасов химического оружия необходимо проведение мероприятий по выводу объектов из эксплуатации. Такие мероприятия проводятся при постоянном аналитическом контроле остаточных содержаний токсичных химикатов в материалах строительных конструкций, на поверхности технологического оборудования, а также в объектах окружающей среды. Для осуществления аналитического контроля необходимы государственные стандартные образцы (ГСО) состава контролируемых соединений. В настоящее время аттестованное значение ГСО состава зарина и зомана определяют в соответствии с методиками измерений МВИ 031-05-022-06 и МВИ 031-05-023-06. В текстах данных методик представлены только формулы для вычисления результатов, тогда как химизм процессов, протекающих при измерении массовой доли основного вещества, не представлен. В данной работе изучены процессы и представлен химизм, положенные в основу аттестованных титрометрических методик определения массовой доли основного вещества в технических продуктах зарина и зомана, применяемых при аттестации стандартных образцов их состава. Актуальность проведённых исследований обусловлена тем, что приготавливаемый для титрования раствор пиррофосфата натрия представляет собой многокомпонентную систему – своеобразный «чёрный ящик» и к нему предъявляются особые требования по диапазону концентраций. В результате выполненных исследований показано, что основным компонентом, который взаимодействует с заринем и зоманом, является пероксид водорода, а не пиррофосфат натрия, остальные же компоненты повышают стабильность концентрации при хранении раствора. По результатам работы были определены оптимальные значения параметров автоматического потенциометрического титрования при работе с платиновым и хлоридсеребряным электродами. Благодаря этому стало возможным снижение навески зарина и зомана при определении массовой доли основного вещества с сохранением либо улучшением точности и прецизионности получаемых результатов. Обозначены пути дальнейшего совершенствования указанных методик, в том числе по их автоматизации.

**Ключевые слова:** стандартный образец, зарин, зоман, определение массовой доли основного вещества, пероксид пиррофосфата натрия, пероксид водорода.

## Chemistry of methods for determining mass fraction of basic substance in certified reference material of the composition of sarin and soman

S. N. Kobtsov<sup>2</sup>, I. Kh. Ilyasov<sup>2</sup>, I. N. Isaev<sup>1</sup>, D. O. Vetkin<sup>2</sup>,  
E. V. Chetyrina<sup>2</sup>, E. V. Maksimova<sup>2</sup>,

<sup>1</sup> Chemical Weapons Safe Keeping and Destruction Federal  
Administration Research Center,  
4a, Sadovniki St., Moscow, Russia, 119160,

<sup>2</sup> Affiliated Branch “Military Unit 21222” of Federal Budget  
Establishment – Military Unit 70855,  
Leonidovka, Penza Region, Russia, 440520,  
e-mail: fubhuho@mail.ru

After completing destruction of chemical weapons stockpiles it is necessary to carry out arrangements for withdrawal of these objects. Such events are held under constant analytical control over the residual content of toxic chemicals in the materials of building structures, on the surface of process equipment and in the environment. For implementation of ana-

lytical control state standard samples (GSO) composition of the monitored compounds are required. Currently, the certified value of certified reference material of sarin and soman composition is determined in accordance with the measurement procedures of MVI and MVI 031-05-022-06 031-05-023-06. In these techniques the formula of computing the results is presented, whereas the chemistry of the processes occurring during measurement of mass fraction of basic substance is not shown. In this study we investigated the processes and presented the chemistry underlying the certified titrimetric methods of determination of mass fraction of basic substance in the technical products of sarin and soman used in certification of standard samples and their composition. The relevance of the conducted research is due to the fact that the solution prepared for titration of pyrophosphate of sodium is a multicomponent system, a kind of “a black box” and it has special requirements for concentration range. The result of the research shows that the main component that interacts with sarin and soman is hydrogen peroxide, not sodium pyrophosphate, and the remaining components increase the concentration stability in the solution storage. According the results the optimal values of parameters of automatic potentiometric titration were determined when working with platinum and chloresteral electrodes. Due to this it became possible to reduce the sample of sarin and soman in determining the mass fraction of the basic substance, preserving or improving the accuracy and precision of the results. The ways of further improvement of these techniques, including their automation, are shown.

**Keywords:** certified reference material, sarin, soman, determination of the mass fraction of the basic substance, peroxide of sodium pyrophosphate, hydrogen peroxide.

После завершения уничтожения запасов химического оружия (ХО) необходимо проведение мероприятий по выводу объектов уничтожения ХО из эксплуатации. Данные мероприятия проводятся при постоянном аналитическом контроле остаточных содержаний токсичных химикатов в материалах строительных конструкций, на поверхности технологического оборудования объектов по хранению и уничтожению химического оружия, так и в объектах окружающей среды [1, 2]. Однако аналитический контроль невозможен без использования государственных стандартных образцов (ГСО) состава контролируемых соединений [3–6]. Основные запасы ХО в РФ составляли фосфорорганические токсичные химикаты (ТХ) – зарин, зоман и вещество типа Vx. Государственные стандартные образцы их состава еще много лет будут востребованы.

В настоящее время аттестованное значение государственных стандартных образцов состава зарина (О-изопропилметилфторфосфоната) (ГСО 8246-2003) и зомана (О-пинаколилметилфторфосфоната) (ГСО 8247-2003) определяют по аттестованным методикам измерений – МВИ 031-05-022-06 и МВИ 031-05-023-06 соответственно [7, 8]. В соответствии с этими методиками массовую долю основного вещества в технических продуктах зарина и зомана определяют в несколько этапов. На первом этапе ТХ взаимодействует с избыт-

ком пероксида пиррофосфата натрия (ППФ), далее образовавшийся продукт и избыточный реагент взаимодействуют с избытком иодида калия, а выделившийся в эквивалентном количестве иод оттитровывают тиосульфатом натрия в присутствии крахмала. Содержание ТХ определяют по разности количества тиосульфата натрия, пошедшего на титрование иода, выделившегося в холостой пробе (без ТХ) и в пробе с анализируемым ТХ [4, 8, 9].

В текстах данных методик представлена только формула для вычисления результатов, в то время как схемы процессов, протекающих при измерении массовой доли основного вещества (химизм), не представлены. Техническая документация по их разработке в доступных нам источниках отсутствует. Исходные данные предположительно были заимствованы из немецких источников.

Актуальность проведенных исследований была обусловлена тем, что к приготавливаемому раствору ППФ, в соответствии с аттестованными методиками, предъявляются особые требования по диапазону концентраций, а также интересна была сама природа происходящих при титровании процессов, так как приготавливаемый раствор пероксида пиррофосфата натрия представляет собой многокомпонентную систему – своеобразный «чёрный ящик».

Так, в соответствии с МВИ № 031-05-022-06 и МВИ № 031-05-023-06, при проверке

Список компонентов раствора ППФ

Таблица

Компонент	Молярная масса, г/моль	Масса, г	Количество, моль
Натрий оловянноокислый мета 2-водный	267	0,045	0,000169
Натрия фосфорнокислый пиро 10-водный	446	12	0,0269
Натрия тетраборнокислый 10-водный	382	5,68	0,0149
Пероксид водорода	34	1,83	0,0538

соответствия концентрации приготовленного раствора ППФ концентрации, требуемой для выполнения измерений на титрование 50 мл этого раствора должно расходоваться от 48 до 50 мл 0,1 н раствора серноватистокислого натрия. При большем или меньшем расходе последнего приготовление раствора ППФ необходимо выполнить заново. Допустимый срок хранения раствора ППФ составляет две недели [7, 8].

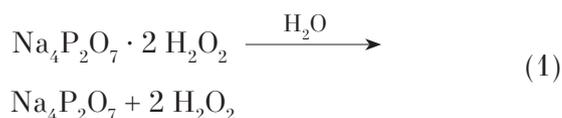
Столь узкий диапазон рабочей концентрации ППФ кажется странным и, скорее всего, обусловлен требованиями к погрешности методик.

В таблице представлен список компонентов, используемых при приготовлении одного литра раствора ППФ, в соответствии с аттестованными методиками. Из таблицы видно, что количество пероксида водорода в приготовляемом ППФ ровно в два раза больше, чем пирофосфата натрия. Количества остальных компонентов стехиометрически никак не относятся к пероксиду водорода. Анализ литературных данных показал, что метастаннат натрия применяется как стабилизатор перекиси водорода. Натрия тетраборнокислый 10-водный (бура) реагирует с перекисью с образованием щадящего окислителя, так как сама по себе перекись чрезвычайно активна. Этот окислитель входит в состав многих бытовых отбеливателей.

Упоминаний о пероксиде пирофосфата натрия не было найдено, однако есть упоминания, что пирофосфаты, взаимодействуя с пероксидом водорода, образуют производные перфосфата, которые являются одновременно поверхностно-активными веществами и очень мягкими окислителями, но менее стойкими, чем другие персоли. Таким образом ситуация стала ещё более запутанной, так как не понятно, образуется ли какое-либо соединение типа ППФ при смешении данных компонентов, либо мы имеем дело с обычным стабилизированным в растворе пероксидом водорода.

Изучение формул для вычисления результатов при определении массовой доли основного вещества, представленных в аттестованных методиках, показало, что при приготовлении раствора ППФ пероксид водорода как таковой никуда не исчезает и остаётся в том же количестве, в каком и добавлялся при приготовлении. Это подтверждается процедурой проверки соответствия концентрации, описанной в методиках. На титрование самих ТХ расходуется удвоенное количество пероксида водорода.

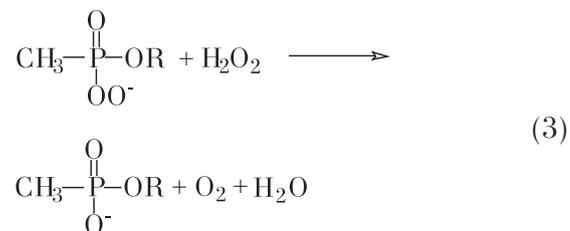
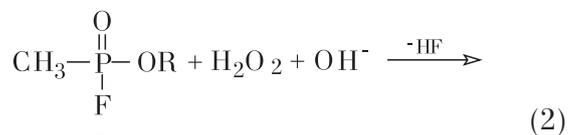
Дополнительный литературный обзор позволил выявить то, что основа аттестованных методик была взята из известной монографии Франке с соавторами [9]. Состав компонентов при приготовлении ППФ взят также оттуда. Изменения коснулись только того, что авторы для приготовления ППФ предлагали использовать пероксид пирофосфата натрия  $\text{Na}_4\text{P}_2\text{O}_7 \cdot 2\text{H}_2\text{O}_2$ . Однако соединение с такой формулой правильно было бы называть пергидратом пирофосфата натрия, в котором пероксид водорода является кристаллизационным и не имеет с пирофосфатом ни ковалентной, ни ионной связи. При попадании в водный раствор данного соединения можно предположить протекание следующего процесса:



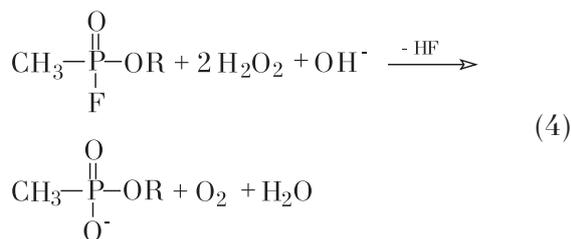
В аттестованных методиках, при добавлении пирофосфата натрия и пероксида водорода в виде индивидуальных соединений в водный раствор, состав готового ППФ будет полностью аналогичен, что является первопричиной строго стехиометрического соотношения в аттестованных методиках между пирофосфатом натрия и пероксидом водорода.

Таким образом, основным компонентом, который взаимодействует с заринем и зоманом, является пероксид водорода, а не ППФ, остальные же компоненты повышают стабильность её концентрации при хранении.

Взаимодействие пероксида водорода с заринем и зоманом, положенное в основу аттестованных титриметрических методик определения массовой доли основного вещества в технических продуктах зарина и зомана, представлено уравнениями (2) и (3):



Данные реакции протекают достаточно быстро (одно из требований титриметрических методик измерений), и суммарно процесс может быть представлен уравнением (4):

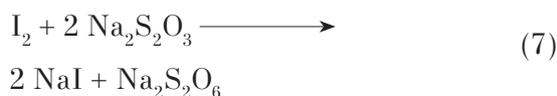


Из уравнения (4) видно, что одна молекула ТХ вступает во взаимодействие с двумя молекулами пероксида водорода, что полностью подтверждает формулу вычисления результатов измерений в аттестованных методиках (5) [7, 8]:

$$M\delta = \frac{T \cdot K_1 \cdot K_2 \cdot (V_K - V) \cdot 100}{m} \quad (5)$$

где  $M\delta$  – массовая доля основного вещества в ТХ (зарина или зомана), % масс.;  $T$  – титр 0,1 н раствора тиосульфата натрия по соответствующему ТХ, г/мл;  $T_{\text{зарин}}$  – 0,0035 г/мл,  $T_{\text{зоман}}$  – 0,00455 г/мл;  $K_1$  – поправочный коэффициент к концентрации раствора серноватистокислого натрия,  $K_1 = 1,0$  при использовании стандарт-титра;  $K_2$  – коэффициент разбавления пробы;  $V$  – объём 0,1 н раствора серноватистокислого натрия, израсходованный на титрование пробы ТХ (зарина или зомана), мл;  $V_K$  – объём 0,1 н раствора серноватистокислого натрия, израсходованный на титрование в контрольном опыте, мл;  $m$  – масса навески пробы ТХ (зарина или зомана), г.

Избыточный пероксид водорода определяют иодометрическим титрованием. Протекающие при этом процессы описываются уравнениями (6) и (7):



Расширение диапазона концентраций рабочего раствора «ППФ» и, как следствие, увеличение его срока годности, применяемого в методиках определения массовой доли зарина и зомана в стандартных образцах титриметрическим методом (МВИ № 031-05-022-06, МВИ № 031-05-023-06), по нашему мнению,

возможно только после расчёта погрешностей методик и выявления вклада каждой составляющей погрешности в общую погрешность методики. Для этого необходимо составление диаграммы вкладов различных влияющих факторов на общую погрешность методик и их количественная оценка. Данная работа в настоящее время ведётся, что позволит обоснованно отойти от текстов методик.

Одной из задач работы являлась также оценка возможности применения автоматического потенциометрического титрования для определения массовой доли зарина и зомана в стандартных образцах. В большинстве случаев удаётся без особых проблем заменить «ручное» титрование на автоматическое без особых изменений самих методик. Ограничения иногда появляются лишь в случаях агрессивных реагентов и проб. Так, МВИ № 031-05-022-06 и МВИ № 031-05-023-06 основаны на окислительно-восстановительном титровании. Ранее нами уже была проведена работа по оптимизации значений параметров титрования на автоматическом потенциометрическом титраторе АТП-02 при проведении окислительно-восстановительного титрования. По результатам работы были определены оптимальные значения параметров автоматического потенциометрического титрования АТП-02 при работе с платиновым и хлоридсеребряным электродами. Однако данные условия были рассчитаны при использовании 0,1 н растворов тиосульфата натрия и иода, тогда как за счёт фиксации точки эквивалентности автоматическим потенциометрическим титратором возможно снижение концентраций титрантов и определяемых веществ без увеличения погрешности определения по сравнению с визуальным определением по изменению окраски химического индикатора. Благодаря этому возможно достижение снижения навески зарина и зомана при определении массовой доли основного вещества с сохранением либо улучшением точности и прецизионности получаемых результатов.

Таким образом, были изучены процессы и представлен химизм, положенные в основу аттестованных титриметрических методик определения массовой доли основного вещества в технических продуктах зарина и зомана, применяемых при аттестации стандартных образцов их состава. Выяснено, что основным компонентом, который взаимодействует с заринном и зоманом, является пероксид водорода, а не пероксид пиродифосфата натрия, указанный в тексте методик, остальные же компоненты

повышают стабильность её концентрации при хранении. Обозначены пути дальнейших исследований по совершенствованию указанных методик, в том числе по их автоматизации за счёт применения автоматического потенциометрического титрования.

## Литература

1. Капашин В.П., Пункевич Б.С., Элькин Г.И. Метрологическое обеспечение уничтожения химического оружия – основа безопасности химического разоружения в Российской Федерации. М.: ФУ БХ УХО. 2010. 174 с.

2. Экологический мониторинг опасных производственных объектов: опыт создания и перспективы развития (на примере систем экологического контроля и мониторинга объектов по уничтожению химического оружия) / Под ред. В.Н. Чуписа. М.: Научная книга. 2010. 526 с.

3. Ашихмина Т.Я. Научно-методологические основы системы комплексного экологического мониторинга объектов хранения и уничтожения химического оружия. Киров: Вятка. 2001. 473 с.

4. Капашин В.П., Пункевич Б.С., Загребин Е.М., Памфилов С.О. Разработка и использование в системах химико-аналитического контроля объектов по уничтожению химического оружия государственных стандартных образцов токсичных химикатов и продуктов их деструкции // Российский химический журнал. 2007. Т. 51. № 2. С. 118–121.

5. Денисов С.Н., Дружинин А.А., Денисов Н.С., Егоров И.В., Кузейкина Э.В., Куранов Г.Н., Цехмистер В.И. Система стандартных образцов состава и свойств отравляющих веществ в рамках химико-аналитического контроля при уничтожении химического оружия // Сборник научных трудов. Выпуск 6. Саратов: СВРХБЗ. 2006. С. 5–8.

6. Штыков С.Н., Кобцов С.Н., Ильясов И.Х., Исаев И.Н., Дубровский Д.С., Язынин С.В. Государственные стандартные образцы состава токсичных химикатов и продуктов их детоксикации в системе экологического контроля и мониторинга объектов по уничтожению химического оружия // Теоретическая и прикладная экология 2011. № 4. С. 57–62.

7. МВИ № 031-05-022-00. МВИ массовой доли основного вещества в техническом продукте зарина титриметрическим методом. М.: ГосНИИОХТ. 2005. 11 с.

8. МВИ № 031-05-023-00. МВИ массовой доли основного вещества в техническом продукте зомана титриметрическим методом. М.: ГосНИИОХТ. 2005. 11 с.

9. Франке Э., Франц П., Варнке В. Химия отравляющих веществ / Под ред. И.Л. Кнунынца, Р.Н. Стерлина. М.: Химия, 1973. Т. 2. 404 с.

## References

1. Kapashin V.P., Punkevich B.S., Elkin G.I. Metrological support for chemical weapons destruction is the basis for safety of chemical disarmament in the Russian Federation. Moskva: FU BH UKhO. 2010. 174 p. (in Russian).

2. Environmental monitoring of hazardous production facilities: experience of creation and development prospects (using the example of environmental monitoring and monitoring systems for chemical weapons destruction facilities) / Ed. V.N. Chupis. Moskva: Nauchnaya kniga. 2010. 526 p. (in Russian).

3. Ashikhmina T.Ya. Scientific and methodological basis of the system of integrated environmental monitoring of chemical weapons storage and destruction. Kirov: Vyatka. 2001. 473 p. (in Russian).

4. Kapashin V.P., Punkevich B.S., Zagrebina E.M., Pamfilov S.O. Development and use of state standard samples of toxic chemicals and products of their destruction in the systems of chemical and analytical control of chemical weapons destruction plants // Rossiyskiy khimicheskiy zhurnal. 2007. T. 51. No. 2. P. 118–121 (in Russian).

5. Denisov S.N., Druzhinin A.A., Denisov N.S., Egorov I.V., Kuzeykina E.V., Kuranov G.N., Tsekhmister V.I. System of standard samples of the composition and properties of toxic agents in the framework of chemical and analytical control over chemical weapons destruction // Sbornik nauchnykh trudov. Vypusk 6. Saratov: SVIRKhBZ. 2006. P. 5–8 (in Russian).

6. Shtykov S.N., Kobtsov S.N., Ilyasov I.Kh., Isayev I.N., Dubrovsky D.S., Yagannin S.V. State standard samples of the composition of toxic chemicals and products of their detoxification in the system of environmental control and monitoring of chemical weapons destruction plants // Teoreticheskaya i prikladnaya ekologiya. 2011. No. 4. P. 57–62 (in Russian).

7. MVI No. 031-05-022-00. MVI mass fraction of the main substance in the technical product of sarin by the titrimetric method. Moskva: GosNIIOKhT. 2005. 11 p. (in Russian).

8. MVI No. 031-05-023-00. MVI mass fraction of the main substance in the technical product of soman by the titrimetric method. Moskva: GosNIIOKhT. 2005. 11 p. (in Russian).

9. Franke Z., Franz P., Warnke V. Chemistry of poisonous substances / Eds. I.L. Knunyants, R.N. Sterlin. Moskva: Khimiya, 1973. V. 2. 404 p. (in Russian).

## Совместное действие экологически опасных факторов

© 2017. А. Ю. Исаева<sup>1</sup>, к. б. н., н. с., Ю. И. Хрипков<sup>2</sup>, д. т. н., с. н. с.,  
 Д. Л. Поклонский<sup>2</sup>, д. т. н., заместитель начальника, Д. А. Зыгин<sup>2</sup>, к. х. н.,  
 начальник отдела, Е. А. Семёнов<sup>2</sup>, с. н. с., Е. Е. Лагуткина<sup>2</sup>, н. с.,

<sup>1</sup> Научно-исследовательский центр Федерального управления  
 по безопасному хранению и уничтожению химического оружия,  
 115487, Россия, г. Москва, ул. Садовники, 4-а,

<sup>2</sup> Научно-исследовательский центр  
 48 Центрального научно-исследовательского института  
 Министерства обороны Российской Федерации,  
 141306, Россия, Московская обл., г. Сергиев Посад, 6,  
 e-mail: fubhuho@mail.ru

В статье представлен анализ совместного действия опасных биологических факторов с другими, в том числе химической и физической природы. Набор вредных воздействий на человека и общество в целом со временем увеличивается вследствие выбранного человечеством техногенного пути развития. При этом различные регионы Российской Федерации могут иметь специфический для каждой отдельной территории комплекс негативных факторов как естественного, так и антропогенного происхождения. На этом фоне может произойти увеличение инфекционных заболеваний из числа характерных для каждой рассматриваемой территории. Особую опасность такого рода сценарии могут приобрести, в частности, в случае аварии на биологически опасных объектах и террористического использования возбудителей инфекционных заболеваний с учётом уже имеющегося комплекса вредных воздействий химической и физической природы. В современных условиях загрязнение окружающей среды продолжает нарастать как по общему объёму, так и по количеству факторов загрязнения. Одновременно экологическая обстановка приобретает новые качества, в частности, это выражается в утяжелении клинического течения инфекционного процесса, большей его длительности, более частом развитии осложнений, хронизации процесса, увеличении количества сопутствующих заболеваний и сроков реконвалесценции. При этом происходят качественные изменения уже известных инфекционных заболеваний, а также появляются новые. Приведённые в статье данные наглядно свидетельствуют о необходимости принимать во внимание совместное действие патогенных для человека микроорганизмов и загрязнителей другой природы. Совместное действие опасного биологического фактора с другими (например, физической или химической природы) может значительно повысить эффект от его воздействия. В связи с отличительными особенностями современных угроз биологического характера особое внимание к себе требует учёт сложившегося антропогенного загрязнения окружающей среды на территории России, поскольку могут возникнуть новые эндемичные районы.

**Ключевые слова:** загрязнение окружающей среды, вредные воздействия, инфекционные заболевания, совместное действие, синергетический эффект.

## Joint impact of ecologically dangerous factors

© 2017. Yu. I. Khripkov<sup>1</sup>, A. Yu. Isaeva<sup>2</sup>, D. L. Poklonsky<sup>1</sup>, D. A. Zygin<sup>1</sup>,  
 E. A. Semenov<sup>1</sup>, E. E. Lagutkina<sup>1</sup>,

<sup>1</sup>Scientific Research Center of the Federal Directorate  
 for the Safe Storage and Destruction of Chemical Weapons,  
 4a, Sadovniki St., Moscow, Russia, 115487,

<sup>2</sup>Scientific Research Center of the Federal State Budgetary Institution  
 “48 Research Institute” of the Ministry of Defense  
 of the Russian Federation,  
 6, Sergiev Posad, Moscow Region, Russia, 105005,  
 e-mail: fubhuho@mail.ru

The article presents the analysis of cases of joint impact of dangerous biological, chemical and physical factors. It was possible to reveal that a set of harmful effects on humans and society as a whole increases over time as a result of the technogenic way of development chosen by mankind. At the same time, different regions of the Russian Federation may have a complex of negative factors specific for each territory, both of natural and anthropogenic origin. Against this

background, there may be an increase in infectious morbidity from those diseases characteristic of the territory under consideration. Such scenarios can be especially dangerous, for example, in case of an accident at biologically hazardous objects, and terrorist use of infectious agents, taking into account the already existing complex of harmful effects of chemical and physical nature. In modern conditions, environmental pollution continues to increase both in terms of total volume and in terms of the number of harmful factors. At the same time, the ecological situation acquires new qualities. Infectious morbidity increases in such conditions. This is indicated in complication of the clinical course of the infectious process, its longer duration, more frequent development of complications, chronization of the process, an increase in the number of concomitant diseases and convalescence timing. At the same time, qualitative changes occur in already known infectious diseases, and new ones also appear. The data presented in the article clearly demonstrate the need to take into account the joint impact of pathogenic microorganisms and pollutants of another nature on humans. This is also a typical example of the combined effect of several harmful factors different in nature, but already in its modern interpretation. The combined effect of a dangerous biological factor with others (for example, the ones of physical or chemical nature) can significantly increase its impact. In connection with the distinctive features of modern biological threats, special attention is required by the consideration of the existing anthropogenic pollution of the environment on the territory of the Russian Federation. For various regions of the Russian Federation, taking into account local ecological features, new endemic areas can be formed.

**Keywords:** environmental pollution, harmful effects, infectious diseases, joint impact, synergistic effect.

С загрязнением окружающей среды человечеству в той или иной степени приходится сталкиваться на протяжении всего своего существования. Существенный вклад в загрязнение вносили такие природные процессы, как лесные пожары, разложение растительности, пыльные бури, извержение вулканов. Однако по мере развития человеческого общества всё большее значение стало приобретать антропогенное загрязнение окружающей среды. Так, ещё в 1272 г. король Англии Эдуард I пытался снизить загрязнение воздуха в Лондоне, запретив использование для отопления жилищ так называемого морского угля, который был плохого качества, но дешёвым [1]. Вместе с этим общую значимость данная проблема стала приобретать относительно недавно. Например, в декабре 1930 г. в долине реки Маас (Бельгия), где были сконцентрированы предприятия тяжёлой промышленности, отмечали сильное трёхдневное задымление, в продолжение которого сотни людей заболели, а 60 человек скончались (норма смертности была превышена более чем в 10 раз). Подобные случаи встречались и в других районах: Манчестер и Солфорд (Англия, 1931 г.), Донор (США, 1948 г.) и многие другие. Статистика показала, что почти все из тех, кто умер неожиданно, страдали от бронхита, сердечных и некоторых других заболеваний.

Причинами роста загрязнения окружающей среды (ОС) является развитие промышленности и автомобильного транспорта, в результате которого происходит непрерывный рост потребления энергии. Особенно важно то, что это происходит непосредственно в местах компактного проживания людей или возле них. При этом загрязнение среды обитания человека в XXI веке приобретает качественно новый характер, продолжая расти количественно [2].

Одновременно повышается фоновая радиоактивность на поверхности Земли, в организме людей появляются сотни чужеродных веществ.

Кроме очевидного самостоятельного значения, связанного со значительным ухудшением условий жизнедеятельности людей, загрязнение ОС несёт в себе и ряд отдалённых угроз. К ним относится уменьшение пригодных для использования в сельском хозяйстве территорий, природных биоресурсов, запасов питьевой воды, опасность возникновения генетических мутаций и некоторые другие. По мере развития науки и производств растёт разнообразие загрязнителей. Это, в свою очередь, может привести и к увеличению числа опасностей как для человечества в целом, так и для отдельных людей. Существенным моментом является то, что загрязнение ОС способствует росту инфекционных заболеваний.

Химический состав загрязнений ОС многокомпонентен, и в РФ он остаётся неблагоприятным [3]. Более 50% городского населения подвержено воздействию загрязнённого атмосферного воздуха. Гигиеническим требованиям не соответствует более 35% поверхностных источников питьевого водоснабжения и более 15% подземных источников из-за повышенного содержания загрязняющих веществ, образующихся в результате промышленного производства. Важным фактором является то, что среди них возрастает доля органических соединений.

Длительное время специалисты отмечают рост инфекционных заболеваний, связанных с присутствием в регионе ряда постоянных специфических воздействий [4, 5]. Причём последние могут иметь физическую (различного рода излучения), химическую (выбросы вредных химических веществ), биологическую (выбросы предприятий биотехнологического

профиля) природу. Важным может быть и сложившийся (или складывающийся) набор лекарственных препаратов, продуктов питания (они, например, могут содержать определённые пищевые добавки), некачественная питьевая вода, чрезмерное употребление алкоголя. Ухудшение экологической обстановки и большие психоэмоциональные нагрузки приводят к значительному увеличению распространённости иммунодефицитов [6]. Показано однозначное негативное воздействие загрязнения ОС на проявление инфекционного и эпидемического процессов при гриппе, ОРЗ, вирусном гепатите А [7], дифтерии [8], кори и эпидемическом паротите [9].

Техногенное загрязнение ОС приводит к утяжелению клинического течения инфекционного процесса, большей его длительности, к более частому развитию осложнений, хронизации процесса, увеличению сопутствующих заболеваний и удлинению сроков реконвалесценции [10]. Одновременно под действием рассматриваемых факторов идёт быстрое изменение свойств возбудителей инфекционных болезней. Формируются новые виды инфекций. Экологический фактор влияет на ускорение эволюции инфекционных болезней [11]. Всё чаще регистрируют необычные комбинации обычных инфекций [12, 13].

Состав комплекса загрязнений ОС, разумеется, специфический для каждого региона. Например, основным источником загрязнения атмосферного воздуха г. Москвы являются автомобильный транспорт (более 90%), выбросы от объектов теплоэнергетики (около 6%), промышленные предприятия (около 4%) [14].

Анализ литературных источников [15–43] свидетельствует о том, что не только загрязнённый воздух способствует росту заболеваемости. Загрязнение питьевой воды, особенно если отсутствует должная её очистка, оказывает аналогичное воздействие. Сюда же относятся различные пищевые добавки, давно получившие широкое распространение, а также некоторые другие факторы. Вместе с этим загрязнение воздушной среды является в рассматриваемой ситуации наиболее опасным вследствие ряда причин: распространение над обширными территориями, воздействие на всех проживающих там людей, быстрота доставки в организм человека.

Так, в г. Благовещенске расположены производства, связанные с вредными выбросами в атмосферу [44]. Одним из них является Башкирский биохимкомбинат, производящий кормовые добавки для повышения продуктив-

ности скота и птицы (кормовой белок). В качестве выбросов отмечены грибы-продуценты р. *Candida* и готовый продукт. Из химических загрязнителей присутствуют выбросы нефтеперерабатывающих предприятий, формальдегид, аммиак, бенз[а]пирен, диоксид азота, диоксид серы, оксид углерода. Общей загрязнённости атмосферы способствуют географические особенности расположения города. Отмечено, что при определённых условиях воздействие химических факторов на организм с изменённой специфической реактивностью к микробному белку может повторно вызвать бронхоспастические реакции аллергической или токсико-аллергической природы даже при отсутствии в атмосферном воздухе белоксодержащей пыли.

Проявлением клинической патологии мог послужить и контакт организма с другими белоксодержащими аллергенами. Отчётливо прослеживается тенденция роста показателей временной нетрудоспособности, это свидетельствует об ухудшении здоровья населения трудоспособного возраста. В рассмотренной ситуации преобладают болезни органов дыхания ОРВИ, ОРЗ, грипп. Отмечено также повышение смертности. Эти показатели достоверно выше, чем аналогичные для благополучных в этом отношении районов.

В районе г. Закаменск (Республика Бурятия) находятся территории длительного хранения отходов Джидинского вольфрамомолибденового комбината. В них содержатся соединения тяжёлых металлов: Pb, Zn, Fe, Mo, Be, Bi, As и др. Загрязнение атмосферного воздуха вносит основной вклад в формирование риска возникновения у городского населения нарушений со стороны органов дыхания (суммарные индексы опасности – 100%), центральной нервной системы (до 89,3%), системы крови (до 59,9%), почек (до 67,6%), эндокринной системы (до 45,3%) [45].

Отмечено, что длительное воздействие промышленных аэрозолей в алюминиевой промышленности приводит к профессиональной бронхолёгочной патологии [46]. Это способствует возникновению респираторных заболеваний.

При хроническом воздействии пылевых промышленных аэрозолей выявлены изменения показателей иммунного статуса у рабочих пылеопасных профессий, что может снижать возможность системного реагирования организма [47].

Добавки глутамата натрия в мясо и сыр способствуют проникновению опасных бак-

терий в организм человека, обходя иммунную систему [48].

Появление в атмосфере биологических компонентов, например, в результате функционирования различного рода производственных мощностей, даже в малых концентрациях, повышает естественную заболеваемость [49–51].

Все описанные выше случаи относятся к складывающейся случайным образом обстановке. Учитывая достигаемые при этом эффекты, можно предположить, что подобные сценарии могут быть вызваны искусственно, например, террористами.

При этом комбинированное действие нескольких поражающих факторов может дать так называемый синергетический эффект, когда их совместное действие будет более сильным, чем сумма эффектов от применения каждого из них в отдельности.

### Заключение

Анализ данных литературы показал, что в современных условиях загрязнение ОС продолжает нарастать как по общему объёму, так и по количеству вредных факторов. Одновременно экологическая обстановка приобретает и новые качества. В этих условиях существенно возрастает инфекционная заболеваемость. Это выражается в утяжелении клинического течения инфекционного процесса, большей его длительности, к более частому развитию осложнений, хронизации процесса, увеличению количества сопутствующих заболеваний, удлинению сроков реконвалесценции. При этом происходят качественные изменения уже известных инфекционных заболеваний, а также появление новых.

Приведённые в статье данные свидетельствуют о необходимости учитывать совместное действие патогенных для человека микроорганизмов и загрязнителей другой природы. Это и типичный пример сочетанного действия нескольких вредных факторов различной природы, но уже в современной его трактовке.

Совместное действие опасного биологического фактора с другими (например, физической или химической природы) может существенно повысить эффект от его воздействия.

В связи с особенностями современных угроз биологического характера особого внимания к себе требует учёт сложившегося антропогенного загрязнения окружающей среды на территории Российской Федерации. В различных регионах России, с учётом мест-

ных экологических особенностей, могут возникнуть новые эндемичные районы.

### Литература

1. Ахмедов А.А. Состояние здоровья населения в районе, загрязнённом фторсодержащими выбросами Таджикского алюминиевого завода // Гигиена и санитария. 2001. № 2. С. 35–38.
2. Бакиров А.Б., Сулейманов Р.А., Абдулнагимов И.Г. Оценка риска здоровью населения, проживающего в условиях сочетанного биологического и химического загрязнения (на примере Башкирского биохимкомбината). Уфа: Гилем, 2011. 280 с.
3. Бейгель Е.А., Катаманова Е.В., Шаяхметов С.Ф. и др. Влияние длительного воздействия промышленных аэрозолей на функциональное состояние бронхолёгочной системы у работников алюминиевого производства // Гигиена и санитария. 2016. Т. 95. № 12. С. 1160–1163.
4. Брико Н.И., Покровский В.И. Глобализация и эпидемический процесс // Эпидемиология и инфекционные болезни. 2010. № 4. С. 4–10.
5. Брико Н.И., Покровский В.И. Инфекционные болезни в эпоху глобализации // Вестник РАМН. 2010. № 11. С. 6–11.
6. Вальпроевая кислота (депакин): серьёзные побочные реакции // Безопасность лекарств: Экспресс-информация. 2000. № 1. С. 14.
7. Вековщина С.А., Клейн С.В., Ханхареев С.С. Оценка качества среды обитания и рисков для здоровья населения г. Закаменска – территории длительного хранения отходов Джидинского вольфрамомолибденового комбината // Гигиена и санитария. 2017. Т. 96. № 1. С. 15–20.
8. Величковский Б.Т. О патогенетическом направлении изучения влияния факторов окружающей среды на здоровье населения // Вестник РАМН. 2003. № 3. С. 3–8.
9. Верещагин Н.Н. Актуальные проблемы инфекционной патологии в регионе с высокой природной антропогенной нагрузкой // Гигиена и санитария. 2002. № 5. С. 37–39.
10. Гусев В.В., Минаева Е.В. Обеспечение устойчивости продовольственной безопасности России // Пищевая промышленность. 2002. № 11. С. 4–5.
11. Даутов Ф.Ф., Шамшеров Н.Н., Хакимова Р.Ф. Влияние загрязнённости атмосферного воздуха на заболеваемость детей острыми респираторными вирусными инфекциями // Гигиена и санитария. 2003. № 4. С. 62–64.
12. Ильина С.В. Клинико-эпидемиологические особенности острых респираторных вирусных инфекций и вирусного гепатита А у детей в районах с разным уровнем техногенного загрязнения окружающей среды: Автореф. ... канд. мед. наук. Иркутск, 2000. 16 с.

13. Калитаев А.Н., Бринцев А.В., Мясников В.В. Защита от оружия массового поражения. 2-е издание. М.: Военное издательство, 1989. 400 с.
14. Каральник Б.М., Маркова С.Г. Экологические аспекты АКДС-вакцинации. ЖМЭИ. 1991. № 12. С. 34–38.
15. Кортикостероиды: побочные реакции при ингаляционном и интраназальном введении // Безопасность лекарств: Экспресс-информация. 2000. № 1. С. 19–20.
16. Крючкова Е.Н., Сааркоппель Л.М., Яцына И.И. Особенности иммунного ответа при хроническом воздействии промышленных аэрозолей // Гигиена и санитария. 2016. Т. 95. № 11. С. 1058–1061.
17. Кульбачевский А.О. Доклад о состоянии окружающей среды в городе Москве в 2013 году. М.: ДАРК ЛТД, 2014.
18. Лошадкин Н.А., Голденков В.А., Хохоев Т.Х. Случаи массовых заболеваний «неясной этиологии». Токсикологические аспекты. Роль малых доз физиологически активных веществ // Российский химический журнал. 2002. Т. XLVI. № 6. С. 46–57.
19. Малышева А.Г., Рахманин Ю.А., Растяников Е.Г., Козлова Н.Ю. Химико-аналитические аспекты исследования комплексного действия факторов окружающей среды на здоровье населения // Гигиена и санитария. 2015. № 7. С. 5–10.
20. Морозов А.А. Технология гомеопатического потенцирования и проблема биологических эффектов малых доз химических веществ // Химическая технология. 2001. № 2. С. 45–47.
21. Мун С.А., Ларин С.А., Глушков А.Н. Влияние роста добычи угля на загрязнение атмосферы и заболеваемость раком лёгкого в Кемеровской области // Современные проблемы науки и образования. 2013. № 1. Р. 69.
22. НАССР – научный системный подход к управлению безопасностью продукции // Пищевая промышленность. 2003. № 4. С. 13–19.
23. Онищенко Г.Г. Гигиенические аспекты обеспечения экологической безопасности при обращении с пестицидами и агрохимикатами // Гигиена и санитария. 2003. № 3. С. 3–5.
24. Онищенко Г.Г. Устойчивое обеспечение питьевой водой населения России для профилактики заболеваемости инфекционными заболеваниями // Гигиена и санитария. 2003. № 2. С. 3–6.
25. Онищенко Г.Г., Пальцев М.А., Зверев В.В. Биологическая безопасность. М.: Медицина, 2006. 304 с.
26. Покровский В.И., Черкасский Б.Л., Солодовников Ю.П. Эпидемический процесс в эпоху научно-технической революции // Руководство по эпидемиологии инфекционных болезней: Вопросы общей эпидемиологии. Т. 1. М.: Медицина, 1993. С. 25–37.
27. Прохоров Н.И., Дроздова Т.В. Влияние химических средств защиты растений на среду обитания и здоровье населения // Гигиена и санитария. 2003. № 4. С. 8–11.
28. Райх Н., Найшитцер К. Контроль безопасности пищевых продуктов в РФ. Пути реформирования // Пищевая промышленность. 2003. № 6. С. 30–31.
29. Рахманин Ю.А., Немыря В.И. Методика изучения белкового загрязнения атмосферного воздуха предприятиями микробного синтеза на здоровье населения // Гигиена и санитария. 2002. № 1. С. 67–69.
30. Румак В.С., Сафронов Г.А. Общая экотоксикология биосистем и органические загрязнители // Медицинские аспекты радиационной и химической безопасности. Материалы Российской научной конференции. СПб., 2001. С. 143–144.
31. Сабирова З.Ф., Фаттахова Н.Ф., Пинигин М.А. Оценка потенциальной опасности для здоровья населения загрязнения окружающей среды // Гигиена и санитария. 2003. № 2. С. 74–76.
32. Савилов Е.Д. Эволюция эпидемического процесса в современных условиях // Вестник РАМН. 2011. № 3. С. 14–48.
33. Савилов Е.Д., Ильина С.В. Инфекционная патология в условиях техногенного загрязнения окружающей среды: клинко-эпидемиологические исследования. Новосибирск: Наука, 2010. 248 с.
34. Савилов Е.Д., Семечкина В.С., Зоркальцева Е.Ю. Эпидемиологические и клинические проявления туберкулеза в условиях техногенного загрязнения окружающей среды. Иркутск: РИО ГБОУ ДПО ИГМАПО, 2012. 124 с.
35. Саноцкий И.В. Проблема отдалённых последствий воздействия экотоксикантов // Медицинские аспекты радиационной и химической безопасности: Материалы Российской научной конференции. СПб., 2001. С. 5–7.
36. Севилов Е.Д., Колесников С.И., Красовский Г.Н. Инфекции и техногенное загрязнение: подходы к управлению эпидемическим процессом. Новосибирск: Наука, 1996.
37. Сизенко Е.И., Панфилов В.А., Андреев С.П. Концепция системы обеспечения безопасности и качества продовольствия в РФ // Пищевая промышленность. 2003. № 1. С. 4–6.
38. Скачков М.В., Смолягин А.И., Боев В.М. Иммунологическая эффективность вакцинации в различных экологических условиях // Эпидемиология и инфекционные болезни. 2001. № 4. С. 47–48.
39. Соседова Л.М. Экспериментальное изучение сочетанного действия факторов биологической и химической природы // Гигиена и санитария. 2003. № 2. С. 51–53.
40. Суханов Б.П. Государственное регулирование в сфере оборота биологически активных добавок // Пищевая промышленность. 2003. № 6. С. 72–73.
41. Уорк К., Уорнер С. Загрязнение воздуха. Источники и контроль / Под ред. Е.Н. Теверовского. М.: Мир, 1980. 544 с.
42. Химическое оружие вероятного противника / Под ред. А.Н. Калитаева. М.: ВАХЗ, 1977. 304 с.

43. Черных А.М. Гигиеническая оценка сочетанного действия электромагнитного поля и пестицидов в эксперименте // Гигиена и санитария. 2003. № 2. С. 56–58.

44. Яблоков А.В. О концепции популяционного груза // Гигиена и санитария. 2015. № 6. С. 11–15.

45. Gabius H.-J., Darro F., Rummelink M. Evidence for stimulation of tumor proliferation in cell lines and histotypic cultures by clinically relevant low doses of the galactoside-binding mistletoe lectin, a component of proprietary extracts // Cancer. Invest. 2001. V. 19. No. 2. P. 114–126.

46. Independent-news.ru [Электронный ресурс] <http://www.independent-news.ru/?p=69964> (Дата обращения 04.11.2017).

47. Kozakova M., Palombo C., Buralli S. Reduced myocardial functional reserve detected by ultra low-dose dobutamine in hypertensive patients with normal left ventricular function at rest // Amer. College Cardiol. 2001. V. 37. No. 2. P. 263A–264A.

48. Neue WGK für wassergefährdende Stoffe // Galvanotechnik. 2001. V. 92. No. 1. P. 234.

49. Offer T., Russo A., Samuni A. The pro-oxidative activity of SOD and nitroxide SOD mimics // FASEB J. 2000. V. 14. No. 9. P. 1215–1223.

50. Scott A. Negotiators to ban eight chemicals; No decision on dioxin // Chem. Week. 1999. V. 161. No. 35. P. 25.

51. Verbotkonvention für zwölf gefährliche Chemikalien ein Stück weiter // Galvanotechnik. 2001. V. 92. No. 4. P. 1115–1117.

## References

1. Akhmedov AA State of health of the population in the area contaminated with fluorine-containing emissions of the Tajik Aluminum Plant // Gigiyena i sanitariya. 2001. No. 2. P. 35–38 (in Russian).

2. Bakirov A.B., Suleimanov R.A., Abdunagimov I.G. Assessment of the risk to the health of the population living in conditions of combined biological and chemical pollution (by the example of the Bashkir Biochemical Plant). Ufa: Guillem, 2011. 280 p. (in Russian).

3. Beigel E.A., Katamanova E.V., Shayakhmetov S.F. Influence of prolonged exposure to industrial aerosols on the functional state of the bronchopulmonary system of workers of aluminum production // Gigiyena i sanitariya. 2016. V. 95. No. 12. P. 1160–1163 (in Russian).

4. Briko N.I., Pokrovsky V.I. Globalization and the epidemic process // Epidemiologiya i infektsionnyye bolezni. 2010. No. 4. P. 4–10 (in Russian).

5. Briko N.I., Pokrovsky V.I. Infectious diseases in the era of globalization // Vestnik RAMN. 2010. No. 11. P. 6–11 (in Russian).

6. Valproic acid (depakin): serious adverse reactions // Bezopasnost lekarstv: Ekspress informatsiya. 2000. No. 1. P. 14 (in Russian).

7. Vekovshina S.A., Klein S.V., Khankhareev S.S. Assessment of the quality of habitat and health risks of the population of Zakamensk – the territory of long-term storage of waste of the Dzhidinsky tungsten-molybdenum plant // Gigiyena i sanitariya. 2017. V. 96. No. 1. P. 15–20 (in Russian).

8. Velichkovsky B.T. On the pathogenetic direction of the study of the influence of environmental factors on public health // Vestnik RAMN. 2003. No. 3. P. 3–8 (in Russian).

9. Vereshchagin N.N. Actual problems of infectious pathology in a region with a high natural anthropogenic load // Gigiyena i sanitariya. 2002. No. 5. P. 37–39 (in Russian).

10. Gusev V.V., Minaeva E.V. Ensuring sustainability of Russia's food security // Pishchevaya promyshlennost. 2002. No. 11. P. 4–5 (in Russian).

11. Dautov F.F., Shamsherov N.N., Khakimova R.F. Influence of air pollution on the incidence of children with acute respiratory viral infections // Gigiyena i sanitariya. 2003. No. 4. P. 62–64.

12. Ilyina S.V. Clinical and epidemiological features of acute respiratory viral infections and viral hepatitis A of children in areas with different levels of technogenic pollution of the environment: Avtoref. diss. ... kand. med. nauk. Irkutsk, 2000. 16 p. (in Russian).

13. Kalitaev A.N., Brintsev A.V., Myasnikov V.V. Protection against weapons of mass destruction. 2nd edition. Moskva: Voennoe izdatelstvo, 1989. 400 p. (in Russian)

14. Karalnik B.M., Markova S.G. Ecological aspects of DTP vaccination. ZhMEI. 1991. No. 12. P. 34–38 (in Russian).

15. Corticosteroids: adverse reactions with inhalation and intranasal administration // Bezopasnost lekarstv: Ekspress-informatsiya. 2000. No. 1. P. 19–20 (in Russian).

16. Kryuchkova E.N., Saarkoppel L.M., Yatsyna I.I. Features of the immune response in chronic exposure to industrial aerosols // Gigiyena i sanitariya. 2016. V. 95. No. 11. P. 1058–1061 (in Russian).

17. Kulbachevsky A.O. Report on the state of the environment in the city of Moscow in 2013. Moskva: DARK LTD, 2014. (in Russian).

18. Loschadkin NA, Goldenkov VA, Khokhlov T.H. Cases of mass diseases of “unclear etiology”. Toxicological aspects. The role of small doses of physiologically active substances // Rossiyskiy khimicheskiy zhurnal. 2002. T. XLVI. No. 6. P. 46–57 (in Russian).

19. Malysheva A.G., Rakhmanin Yu.A., Rastyanikov E.G., Kozlova N.Yu. Chemical analytical aspects of the study of the complex effect of environmental factors on human health // Gigiyena i sanitariya. 2015. No. 7. P. 5–10 (in Russian).

20. Morozov A.A. The technology of homeopathic potentiation and the problem of biological effects of small doses of chemical substances // Khimicheskaya tekhnologiya. 2001. No. 2. P. 45–47 (in Russian).

21. Mun S.A., Larin S.A., Glushkov A.N. Influence of coal production growth on atmospheric pollution and lung cancer incidence in Kemerovo region // *Sovremennyya problemy nauki i obrazovaniya*. 2013. No. 1. P. 69 (in Russian).
22. HACCP – scientific system approach to product safety management // *Pishchevaya promyshlennost*. 2003. No. 4. P. 13–19 (in Russian).
23. Onishchenko G.G. Hygienic aspects of ensuring environmental safety in handling pesticides and agrochemicals // *Gigiyena i sanitariya*. 2003. No. 3. P. 3–5 (in Russian).
24. Onishchenko G.G. Sustainable supply of drinking water to the population of Russia to prevent the incidence of infectious diseases // *Gigiyena i sanitariya*. 2003. No. 2. P. 3–6 (in Russian).
25. Onishchenko G.G., Paltsev M.A., Zverev V.V. Biological safety. Moskva: Meditsina, 2006. 304 p. (in Russian).
26. Pokrovsky V.I., Cherkassky B.L., Solodovnikov Yu.P. Epidemic process in the era of scientific and technological revolution // *Guide to epidemiology of infectious diseases: Issues of general epidemiology*. T. 1. Moskva: Meditsina, 1993. P. 25–37 (in Russian).
27. Prokhorov N.I., Drozdova T.V. Influence of chemical means of plant protection on the habitat and health of the population // *Gigiyena i sanitariya*. 2003. No. 4. P. 8–11 (in Russian).
28. Reich N., Najshitzer K. Control of food safety in the Russian Federation. Ways of reforming // *Pishchevaya promyshlennost*. 2003. No. 6. P. 30–31 (in Russian).
29. Rakhmanin Yu.A., Nemyria V.I. A technique for studying protein contamination of atmospheric air by microbial synthesis enterprises on public health // *Gigiyena i sanitariya*. 2002. No. 1. P. 67–69 (in Russian).
30. Rumak V.S., Safronov G.A. General ecotoxicology of biosystems and organic pollutants // *Medical aspects of radiation and chemical safety: Materialy Rossiyskoy nauchnoy konferentsii*. St. Petersburg, 2001. P. 143–144 (in Russian).
31. Sabirova Z.F., Fattakhova N.F., Pinigin M.A. Assessment of the potential danger to human health of environmental pollution // *Gigiyena i sanitariya*. 2003. No. 2. P. 74–76 (in Russian).
32. Savilov E.D. Evolution of the epidemic process in modern conditions // *Vestnik RAMN*. 2011. No. 3. P. 14–48 (in Russian).
33. Savilov E.D., Ilyina S.V. Infectious pathology in conditions of technogenic pollution of the environment: clinical and epidemiological studies. Novosibirsk: Nauka, 2010. 248 p. (in Russian).
34. Savilov E.D., Semechkina V.S., Zorkaltseva E.Yu. Epidemiological and clinical manifestations of tuberculosis in conditions of technogenic pollution of the environment. Irkutsk: RIO GBOU DPO IGMAPO, 2012. 124 p. (in Russian).
35. Sanotsky I.V. The problem of long-term consequences of exposure to ecotoxicants // *Medical aspects of radiation and chemical safety: Materialy Rossiyskoy nauchnoy konferentsii*. St. Petersburg, 2001. P. 5–7 (in Russian).
36. Sevilov E.D., Kolesnikov S.I., Krasovskiy G.N. Infections and technogenic pollution: approaches to managing the epidemic process. Novosibirsk: Nauka, 1996. (in Russian).
37. Sizenko E.I., Panfilov V.A., Andreev S.P. The concept of a system to ensure the safety and quality of food in the RF // *Pishchevaya promyshlennost*. 2003. No. 1. P. 4–6 (in Russian).
38. Skachkov M.V., Smolyagin A.I., Boev V.M. Immunological effectiveness of vaccination in various environmental conditions // *Epidemiologiya i infektsionnyye bolezni*. 2001. No. 4. P. 47–48 (in Russian).
39. Sosedova L.I. Experimental study of the combined effect of biological and chemical factors // *Gigiyena i sanitariya*. 2003. № 2. P. 51–53 (in Russian).
40. Sukhanov B.P. State regulation in the sphere of turnover of biologically active additives // *Pishchevaya promyshlennost*. 2003. No. 6. P. 72–73 (in Russian).
41. Work K., Warner C. Air pollution. Sources and control / Ed. E.N. Teverovskiy. Moskva: Mir, 1980. 544 p. (in Russian).
42. Chemical weapons of a possible adversary / Ed. A.N. Kalitaev. Moskva: VAHZ, 1977. 304 p. (in Russian).
43. Chernykh A.M. Hygienic assessment of the combined effect of the electromagnetic field and pesticides in the experiment // *Gigiyena i sanitariya*. 2003. No. 2. P. 56–58 (in Russian).
44. Yablokov A.V. On the concept of population load // *Gigiyena i sanitariya*. 2015. No. 6. P. 11–15 (in Russian).
45. Gabius H.-J., Darro F., Rimmelink M. Evidence for stimulation of tumor proliferation in cell lines and histotypic cultures by clinically relevant low doses of the galactoside-binding mistletoe lectin, a component of proprietary extracts // *Cancer. Invest*. 2001. V. 19. No. 2. P. 114–126.
46. Independent-news.ru [Internet resource] <http://www.independent-news.ru/?p=69964> (Accessed: 04.11.2017) (in Russian).
47. Kozakova M., Palombo C., Buralli S. Reduced myocardial functional reserve detected by ultra low-dose dobutamine in hypertensive patients with normal left ventricular function at rest // *Amer. College Cardiol*. 2001. V. 37. No. 2. P. 263A–264A.
48. Neue WGK für wassergefährdende Stoffe // *Galvanotechnik*. 2001. V. 92. No. 1. P. 234.
49. Offer T., Russo A., Samuni A. The pro-oxidative activity of SOD and nitroxide SOD mimics // *FASEB J*. 2000. V. 14. No. 9. P. 1215–1223.
50. Scott A. Negotiators t. ban eight chemicals; No decision on dioxin // *Chem. Week*. 1999. V. 161. No. 35. P. 25.
51. Verbotskonvention für zwölf gefährliche Chemikalien ein Stück weiter // *Galvanotechnik*. 2001. V. 92. No. 4. P. 1115–1117.

## Адсорбционные модели для описания равновесия в системе арсенит-ион – почва

© 2017. М. А. Шумилова, к. х. н., с. н. с.,  
В. Г. Петров, д. х. н., зав. лабораторией,  
Институт механики Уральского отделения РАН,  
426067, г. Ижевск, ул. Т. Барамзиной, 34,  
e-mail: mashumilova@mail.ru

Прогноз подвижности арсенит-иона является критическим при оценке риска для почв, загрязнённых мышьяком. Рассмотрены закономерности поглощения арсенит-иона почвами Удмуртии. Проведена аппроксимация экспериментально полученных изотерм адсорбции с использованием моделей Лэнгмюра и Дубинина – Радушкевича. Определены константы и параметры всех указанных уравнений, а также величины изобарно-изотермического потенциала и свободной энергии адсорбции арсенит-иона в исследуемых почвенных образцах. Установлено, что сорбция арсенит-ионов почвенным поглощающим комплексом (ППК) обладает физической природой. Найдено, что уравнение Дубинина – Радушкевича лучше описывает процесс адсорбции  $\text{AsO}_2^-$  почвами по сравнению с уравнением Лэнгмюра. Величина энергии связи по отношению к арсениту для различных типов почв невелика и находится в диапазоне 2,28–3,67 кДж/моль, что указывает на слабую фиксацию иона почвами. Невысокое сродство арсенит-ионов с ППК обуславливает его высокую миграционную способность в почвенном профиле, которую необходимо учитывать при организации экологического мониторинга особо опасных объектов, использующих в производственном цикле данные соединения.

**Ключевые слова:** арсенит-ион, адсорбция, модель Лэнгмюра, модель Дубинина – Радушкевича, константы адсорбции, изобарно-изотермический потенциал, свободная энергия адсорбции.

## Adsorption models for describing equilibrium in the arsenite-ion – soil system

M. A. Shumilova, V.G. Petrov,  
Institute of Mechanics of Ural branch Russian Academy of Sciences,  
34, T. Baramzinoy St., Izhevsk, Russia, 426067,  
e-mail: mashumilova@mail.ru

The increased content of arsenic compounds at some sampling points in the district of the chemical weapons (lewisite) destruction plant is apparently due to both production activity of the plant itself and presence of copper deposits previously used. The forecast of arsenic mobility is critical in assessing the risk for soils contaminated with arsenic compounds. Reliable ecological predictions can be made only on the basis of exact knowledge of the processes occurring with pollutants in the natural environment. The study of sorption processes of arsenic ions by the soil cover of the Udmurt Republic is an actual problem that will allow carrying out measures to prevent spread of pollutants in natural areas.

Adsorption of arsenite-ion by sod-strongly podzolic, sod-carbonate and gray forest soils was carried out under static conditions. The number of absorbed ions was found from the difference between the initial and equilibrium concentrations, which were determined by atomic absorption spectrophotometry.

The experimentally obtained adsorption isotherms were explained using Langmuir and Dubinin-Radushkevich models.

According to the Langmuir equation, sod-carbonate soil has the greatest sorption capacity with respect to arsenite-ion (1.667 mmol/kg), then in descending order follows gray forest soil (0.952 mmol/kg), and, finally, sod-strongly podzolic soil (0.784 mmol/kg). However, the strength of the resulting bonds in sod-carbonate soil (11.25 dm<sup>3</sup>/mmol) is small in comparison with sod-podzolic soil (71.25 dm<sup>3</sup>/mmol). Gray forest soil with a slight advantage in sorption capacity is considerably inferior to sod-strongly podzolic soil in the retention force of arsenite-ion (14.25 dm<sup>3</sup>/mmol).

To study the mechanism of the adsorption process, we examined the equilibrium data using the Dubinin-Radushkevich isotherm model. The calculated values of the free energy of adsorption for all soil samples under study are less than 8 kJ/mol, which indicates the physical nature of interaction of the adsorbate with the adsorbent. Weak fixation of arsenic ions by soil causes its high mobility. The values of interaction energy of adsorbed arsenite-ions with soil, calculated by the Dubinin-Radushkevich equation, are insignificant. The maximum energy of 3.67 kJ/mol was recorded for sod-podzolic soils and the minimum energy of 2.28 kJ/mol was found for sod-carbonate soil, gray forest soil occupies the middle position (3.04 kJ/mol).

Thus, it is necessary to take into account the high mobility of arsenite-ions in natural environments in organization of environmental monitoring of especially dangerous objects using arsenic compounds in the production cycle.

**Keywords:** arsenite-ion, adsorption, Langmuir model, Dubinin-Radushkevich model, adsorption constants, isobaric-isothermal potential, free energy of adsorption.

Антропогенная деятельность приводит к длительному загрязнению почвы токсичными химическими элементами, способными по трофической цепи передаваться в организм человека. В постоянно изменяющейся природно-техногенной системе очень важно достоверно отслеживать динамику содержания поллютантов в окружающей среде в целях комплексной оценки экологической ситуации и принятия своевременных организационных природоохранных действий. Результаты экологического мониторинга природных сред Удмуртии в районе объекта по уничтожению химического оружия (УХО) как до начала работы объекта, так и после её завершения [1–3], показали в отдельных точках пробоотбора превышение ПДК для соединений мышьяка, относящихся к веществам первого класса опасности. Зафиксированное повышенное содержание элемента, по-видимому, обусловлено как деятельностью объекта по уничтожению химического оружия, в частности люизита, так и наличием использованных ранее месторождений меди. Элемент в виде арсенита в природных объектах находится в анионной форме, что обуславливает его высокую миграционную способность в почвенном профиле, поступление в подземные воды и открытые водоёмы [4]. Прогноз подвижности мышьяка является критическим при оценке риска для почв, загрязнённых его соединениями. Надёжные экологические прогнозы могут быть осуществлены только на основе точного знания процессов, происходящих с загрязняющими веществами в природной среде. Поэтому исследование процессов сорбции арсенит-ионов почвенным покровом Удмуртии является актуальной задачей, которая позволит проводить мероприятия по предотвращению распространения поллютантов в природных объектах.

### Материалы и методика исследования

В качестве объекта исследования были выбраны верхние гумусированные горизонты некоторых распространённых типов почв Удмуртии: дерново-сильнопodzолистой слабосмытой, дерново-карбонатной выщелоченной

слабосмытой и серой лесной оподзоленной, агрохимические характеристики которых представлены в таблице 1. Сорбцию арсенит-ионов изучали в лабораторных условиях статически. Отбор, транспортировка и хранение почвенных образцов для проведения исследований осуществлялись согласно стандартам [5, 6]. Пробоподготовку почвенных образцов и определение таких агрохимических показателей, как содержание гигроскопической влаги, рН водной и солевой вытяжки, содержание гумуса проводили в соответствии с требованиями стандартных методов [7]. Значение рН почвенных фильтратов устанавливали потенциометрическим методом на иономере И-160 МИ.

Исходные растворы арсенит-иона с содержанием металла 60,0 мг/дм<sup>3</sup> для изучения сорбционных процессов готовили растворением навески соответствующей соли Na-AsO<sub>2</sub> квалификации «ч. д. а.» (чистый для анализа), точную концентрацию устанавливали спектроскопически. Воздушно-сухие почвенные образцы массой 20 г, измельчённые до размера частиц < 0,1 мм, помещали в центрифужные колбы и добавляли по 180 мл растворов арсенит-иона с концентрацией, варьирующей от 2,95 до 58,99 мг/дм<sup>3</sup>. Далее колбы с суспензиями кратковременно взбалтывали в течение двух дней. После взаимодействия на протяжении нескольких суток твёрдой фазы с раствором пробы центрифугировали в течение 10 мин со скоростью 2500 об/мин. В надосадочной жидкости определяли равновесную концентрацию ионов металлов методом атомно-абсорбционной спектроскопии с электротермической атомизацией на приборе «Shimadzu-AA7000» (Япония) по стандартной методике М-02-902-125-2005 [8]. Реактивы, используемые для спектрального анализа, имели квалификацию «ос. ч.» (особо чистый). Количество поглощённых ионов находили по разности между исходными и равновесными концентрациями. Все экспериментальные точки получены в трёх повторностях, приведённые данные являются их средними величинами; относительное значение стандартного отклонения находится в пределах 6,0%.

Результаты и обсуждение

Адсорбция является самопроизвольным процессом аккумуляции вещества на границе раздела фаз. Изотерма адсорбции представляет собой график зависимости количества адсорбированного вещества от его равновесной концентрации, построенный по результатам измерений в экспериментах с серией растворов с различными исходными и соответственно с различными равновесными концентрациями адсорбата.

Для описания изотерм поглощения ионов металлов почвой, включающих и хемосорбцию, и ионный обмен, часто используют уравнение Лэнгмюра [9], которое имеет следующий вид:

$$A = A_{\max} \frac{K_L \cdot C}{1 + K_L \cdot C} \quad (1)$$

или в линеаризованной форме:

$$\frac{1}{A} = \frac{1}{A_{\max}} + \frac{1}{A_{\max} \cdot K_L \cdot C} \quad (2),$$

где  $A$  – количество компонента, адсорбированного твёрдой фазой, отнесённой к её массе;  $C$  – равновесная концентрация компонента в растворе;  $K_L$  – эмпирический коэффициент адсорбции, или коэффициент Лэнгмюра, характеризующий прочность связи между элементом и сорбционными участками и энергию их взаимодействия;  $A_{\max}$  – максимум адсорбции, или ёмкость моно слоя Лэнгмюра.

Для получения большего объёма информации из экспериментальных данных нами были проанализированы зависимости, полученные на основе уравнения Лэнгмюра [10, 11]:

$$\frac{C}{A} = \frac{1}{A_{\max} K_L} + \frac{1}{A_{\max}} C \quad (3).$$

На рисунке представлены зависимости  $C/A$  от  $C$  для арсенит-иона. Данные кривые могут считаться графическим выражением уравнения (3), если зависимость  $C/A$  от  $C$  является монотонно возрастающей. Как следует из рисунка, кривые поглощения дерново-сильноподзолистой и дерново-карбонатной почвами арсенит-иона после превышения величины его равновесной концентрации в  $30,0 \text{ мг/дм}^3$  не подчиняются уравнению сорбции Лэнгмюра, поскольку наблюдается уменьшение отношения  $C/A$  с увеличением  $C$ . В варианте с серой лесной почвой для арсенит-иона зафиксировано монотонное возрастание функции во всём диапазоне равновесных концентраций, что говорит о применимости изотермы Лэнгмюра для описания сорбционного процесса. С математической точки зрения, убывание функции  $C/A$  свидетельствует о том, что при каком-либо значении равновесной концентрации иона в растворе поглощается элемента больше, чем это происходило бы в случае соответствия поглощения элемента обычным представлениям о сорбции вещества

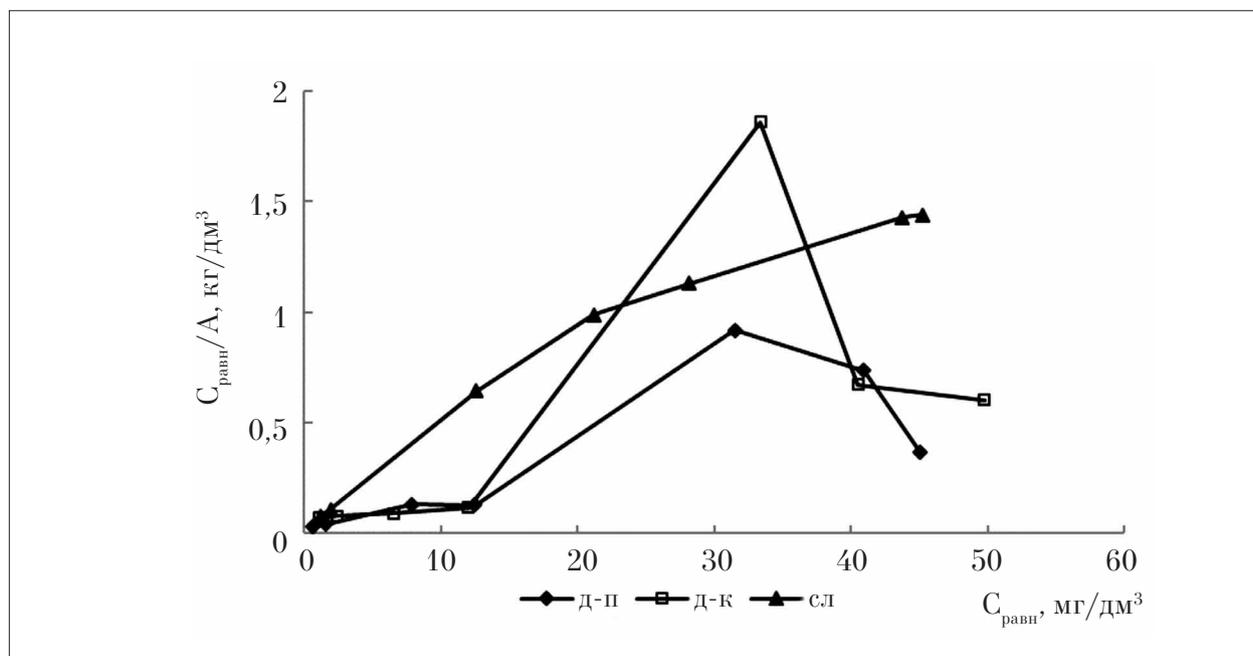


Рис. Изотермы сорбции арсенит-иона дерново-подзолистой (д-п), дерново-карбонатной (д-к) и серой лесной (сл) почвами

Таблица 1

Основные агрохимические параметры почвенных образцов

№ п/п	Тип почвы	Гранулометрический состав	Гигроскопическая влага	Гумус, %	рН	
					H <sub>2</sub> O	KCl
1	Дерново-сильнопodzолистая супесчаная	Тяжело-суглинистая почва	2,68	7,69	6,2	5,6
2	Дерново-карбонатная выщелоченная слабосмытая		2,51	3,28	6,6	5,6
3	Серая лесная опodzоленная		2,49	4,74	6,4	5,4

Таблица 2

Параметры модели Лэнгмюра

Тип почвы	A <sub>max</sub> , ммоль/кг	K <sub>L</sub> , дм <sup>3</sup> /ммоль	R <sub>L</sub>	ΔG, кДж/моль
Дерново-сильнопodzолистая	0,784	71,25	0,263	2,72
Дерново-карбонатная	1,667	11,25	0,693	2,27
Серая лесная	0,952	14,25	0,641	2,33

на энергетически неоднородной поверхности. Согласно этим представлениям первоначально происходит взаимодействие сорбата с самыми реакционноспособными сорбционными центрами с образованием наиболее прочных связей. По мере заполнения таких центров в процесс сорбции вовлекаются всё более слабые центры, что влечёт за собой возрастание функции в координатах C/A – C.

Линии зависимостей C/A от C для дерново-карбонатной и серой лесной почв по отношению к арсенит-иону расположены выше линии зависимости для дерново-сильнопodzолистой почвы. Данный факт свидетельствует о том, что при одинаковых равновесных концентрациях мышьяка дерново-карбонатная и серая лесная почвы поглощают этот элемент в меньших количествах, чем дерново-подзолистая. Отсутствие убывающего участка у серой лесной почвы указывает на невысокую интенсивность поглощения арсенит-иона даже при низких концентрациях металла в исходных растворах. Полученные закономерности находятся в полном соответствии с вычисленными ранее для данных почв коэффициентами Лэнгмюра (табл. 2) [12]. Согласно теории Лэнгмюра, для хороших сорбентов характерны высокие значения A<sub>max</sub> и низкие значения K<sub>L</sub> [13].

Исходя из табличных данных (табл. 2) видно, что наибольшей сорбционной ёмкостью по отношению к арсенит-иону обладает дерново-карбонатная почва, затем – серая лесная и, наконец, дерново-сильнопodzолистая, что объ-

ясняется их агрохимическими показателями (табл. 1). Однако прочность образующихся связей у дерново-карбонатной почвы мала в отличие от дерново-подзолистой почвы, серая лесная почва при небольшом преимуществе в величине сорбционной ёмкости значительно уступает в силе удерживания арсенит-иона дерново-сильнопodzолистой почве.

Степень сродства между сорбентом и адсорбатом может быть оценена и по величине безразмерного параметра равновесия R<sub>L</sub>, установленного с использованием K<sub>L</sub> [14, 15]:

$$R_L = \frac{1}{1 + K_L \cdot C_0}, \quad (4)$$

где C<sub>0</sub> – начальная концентрация ионов металла в растворе, моль/дм<sup>3</sup>.

Более низкое значение R<sub>L</sub> для дерново-подзолистой почвы также указывает на то, что поглощение этой почвой арсенит-иона происходит значительно по сравнению с серой лесной и дерново-карбонатной почвами.

Широко применяемая модель адсорбции Лэнгмюра не даёт никакой информации о механизме адсорбции. Для изучения механизма адсорбционного процесса равновесные данные были нами проверены с помощью модели изотермы Дубинина – Радушкевича [16, 17]. Уравнение Дубинина – Радушкевича можно представить в следующем виде:

$$A = A_{max} \exp(-k \cdot \varepsilon^2) \quad (5),$$

Таблица 3

Параметры модели Дубинина – Радушкевича

Тип почвы	$A_{\max}$ , моль/кг	$k$ , моль <sup>2</sup> /кДж	$E$ , кДж/моль
Дерново-сильноподзолистая	0,0016	0,0372	3,67
Дерново-карбонатная	0,0016	0,0958	2,28
Серая лесная	0,0006	0,0541	3,04

где  $k$  – константа (моль<sup>2</sup>/кДж<sup>2</sup>), связанная с энергией адсорбции;  $\epsilon$  – потенциал Поляни (кДж/моль) [18], отражающий изотермическую работу переноса одного моля арсенит-иона из объёма равновесного раствора к поверхности сорбента и определяемый из выражения:

$$\epsilon = RT \ln(1 + 1/C_{\text{равн}}) \quad (6),$$

где  $R$  – универсальная газовая постоянная (8,314·10<sup>-3</sup>кДж/(моль·К)) и  $T$  – абсолютная температура (К).

Изотерма Дубинина – Радушкевича является более общей по сравнению с изотермой Лэнгмюра, поскольку она не предполагает гомогенности поверхности и постоянства адсорбционного потенциала. Данная изотерма широко применяется для установления физической или химической природы адсорбции.

Логарифмируя уравнение (5), получаем линейную форму:

$$\ln A = \ln A_{\max} - k \cdot \epsilon^2 \quad (7),$$

и строим график зависимости  $\ln A$  от  $k \cdot \epsilon^2$ , в котором по наклону прямой и отрезку, отсекаемому на оси ординат, можно определить константы  $k$  и  $A_{\max}$ .

Модель Дубинина – Радушкевича указывает на природу адсорбции адсорбата на адсорбенте и может быть использована для расчёта средней свободной энергии адсорбции [19]:

$$E = (-2k)^{-0.5}. \quad (8)$$

В таблице 3 представлены значения этих констант, полученных графическим способом.

Величина свободной энергии адсорбции  $E$  в уравнении (8) очень важна, так как по её численному значению можно судить о природе сил взаимодействия между арсенит-ионами с активными центрами почвенной поверхности, то есть ответить на вопрос, является ли закрепление ионов арсенита на поверхности почвы физическим процессом или оно имеет химический характер. При значении  $E < 8$  кДж/моль

имеет место физическая адсорбция; при  $8 < E < 16$  кДж/моль – хемосорбция. Рассчитанные величины свободной энергии адсорбции для всех исследуемых образцов почв (табл. 3) менее 8 кДж/моль, что свидетельствует о физической природе взаимодействия адсорбата с адсорбентом и, следовательно, о слабой фиксации почвой арсенит-ионов, обуславливая его высокую мобильность.

Если сравнить такие термодинамические показатели процесса адсорбции, как значения изобарно-изотермического потенциала  $G$  и энергию взаимодействия адсорбирующихся арсенит-ионов  $E$  с почвенным поглощающим комплексом (ППК), а также величину максимальной адсорбции, вычисленных по моделям Лэнгмюра и Дубинина – Радушкевича (табл. 2, 3), то видно, что значения этих параметров отличаются друг от друга. Аналогичное различие в значениях этих показателей были отмечены Далалом при изучении параметров сорбции фосфатов [20].

Разницу в значениях параметров можно объяснить полуэмпирическим характером обоих уравнений, а также особенностями расчёта этих параметров. Так, уравнение Лэнгмюра описывает модель, характеризующуюся образованием монослоя на поверхности почвенных частиц, в то время как уравнение Дубинина – Радушкевича допускает образование нескольких слоёв и описывает модель для пористых структур, каковой и является почва. Значения  $E$ , рассчитанные по уравнению Дубинина – Радушкевича, соответствуют наиболее полным заполнениям всех обменных позиций пористых структур и суммарно отражают все, включая и самые слабые, взаимодействия поглощённых анионов с обменной фазой. Значения  $E$  для арсенит-иона весьма незначительны: максимальна у дерново-подзолистой почвы (3,67 кДж/моль), минимальна у дерново-карбонатной почвы (2,28 кДж/моль), величина свободной энергии адсорбции для серой лесной почвы занимает среднее положение среди исследованных типов почвы (3,04 кДж/моль). Закономерности в величинах изобарно-изотермического потенциала у почв аналогичны, однако их величины имеют ещё

меньшее значение. Всё это указывает на слабое закрепление элемента почвами.

### Выводы

В стационарных условиях исследована адсорбция арсенит-иона на трёх типах почв Удмуртской Республики. Экспериментальные данные по адсорбции были обработаны с применением моделей Лэнгмюра и Дубинина-Радушкевича. Определены константы этих уравнений, на основе которых были рассчитаны величины изобарно-изотермического потенциала и свободной энергии адсорбции арсенит-иона на представленных почвенных образцах. Установлено, что сорбция арсенит-ионов ППК имеет физическую природу. Найдено, что уравнение Дубинина – Радушкевича лучше описывает процесс адсорбции  $AsO_2^-$  почвами по сравнению с уравнением Лэнгмюра. По показателю величины энергии связи арсенит-иона незначительно прочнее сорбируется дерново-слабоподзолистой почвой, однако разница в величинах энергии связи для различных типов почв невелика и находится в диапазоне 2,28–3,67 кДж/моль, что указывает на слабую фиксацию иона почвами. Вследствие малых сил взаимодействия ППК с арсенит-ионом последний обладает повышенной лабильностью и способен легко мигрировать в почвенном профиле, перемещаясь в подземные воды и открытые водоёмы. Высокую подвижность арсенит-ионов следует иметь в виду, проводя организацию экологического мониторинга особо опасных объектов, использующих в производственном цикле данные соединения.

### Литература

1. Решетников С.М., Макарова Л.Л., Корнев В.И., Ионов Л.Б., Плетнев М.А. Результаты исследования почв и водоёмов в 30-километровой зоне г. Камбарки на содержание в них мышьяка и некоторых тяжёлых металлов // Вестник Удмуртского университета. 1994. Спецвыпуск. Вып. 3. С. 109–121.
2. Шумилова М.А. Содержание тяжёлых металлов в почвах Камбарского района // Вестник КИГИТ. 2014. №10 (52). С. 33–42.
3. Кургузкин М.Г., Фризоргер Г.Г. Специфические особенности и объём выполняемых работ РЦ СГЭК и М по УР в рамках обеспечения ведения системы государственного экологического контроля и мониторинга деятельности объектов по хранению и уничтожению химического оружия УР // Химическое разоружение-2009: итоги и аспекты технологических решений, экоаналитического контроля и медицинского монито-

ринга «СНЕМДЕТ-2009»: Сборник трудов III Всероссийской конференции с международным участием. Ижевск: ИПМ УрО РАН, 2009. С. 142–149.

4. Рыженко Б.Н., Черкасова Е.В., Лиманцева О.А. Модель формирования загрязнения подземных вод мышьяком.
2. Влияние сорбции // Геохимия. 2009. № 10. С. 1041–1049.
5. ГОСТ 17.4.3.01-83. Охрана природы. Почвы. Общие требования к отбору проб. М.: ИПК Изд-во Стандартов, 2004. 4 с.
6. ГОСТ 28168-89. Отбор проб. М.: Стандартинформ, 2008. 7 с.
7. Аринушкина Е.В. Руководство по химическому анализу почв. М.: Изд-во МГУ, 1970. 487 с.
8. М-03-505-119-03. Методика количественного химического анализа. Определение металлов в питьевой, минеральной, природной, сточной воде и в атмосферных осадках атомно-абсорбционным методом. С-Пб., 2005. 28 с.
9. Langmuir I. The constitution and fundamental properties of solids and liquids // J. Am. Chem. Soc. 1916. V. 38. No. 11. P. 2221–2295.
10. Фролов Ю.Г. Курс коллоидной химии. Поверхностные явления и дисперсные системы. М.: Химия, 1988. 464 с.
11. Rouquerol J., Rouquerol F., Sing R.S.W. Adsorption by Powders and Porous Solids: Principles, Methodology and Applications. Academic Press: London – San-Diego. 1999. 467 p.
12. Шумилова М.А., Петров В.Г. Адсорбция арсенит-иона некоторыми почвами Удмуртии // Теоретическая и прикладная экология. 2016. № 4. С. 56–62.
13. Никифорова Т.Е. Физико-химические основы хемосорбции ионов d-металлов модифицированными целлюлозосодержащими материалами: Дисс. ... докт. хим. наук. Иваново: ФГБОУ ВПО ИГХТУ. 2014. 365 с.
14. Hubbe M.A., Hasan S.H., Ducoste J.J. Cellulosic substrates for removal of pollutants from aqueous systems: a review. 1. Metals // BioResources. 2011. V. 6 (2). P. 2181–2287.
15. Ghorai Subhashini, Pant K.K. Equilibrium, kinetics and breakthrough studies for adsorption of fluoride on activated alumina // Separation and Purification Technology. 2005. V. 42. P. 265–271.
16. Дубинин М.М., Радушкевич Л.В. К вопросу об уравнении характеристической кривой для активных углей // Докл. АН СССР. 1947. Т. 55. С. 331–334.
17. Дубинин М.М., Заверина Е.Д., Радушкевич Л.В. Современное состояние теории объёмного заполнения микропор углеродных адсорбентов // ЖФХ. 1991. № 1. С. 9–30.
18. Щукин Е.Д., Перцов А.В., Амелина Е.А. Коллоидная химия. М.: Высшая школа, 2004. 445 с.
19. Никифорова Т.Е., Козлов В.А., Родионова М.В., Модина Е.А. Сорбция ионов цинка продуктами, содержащими целлюлозную и белковую составляющие // Известия вузов. Химия и химическая технология. 2009. Т. 52. Вып. 3. С. 27–31.

20. Dalal R.C. Application of Dubinin-Radushkevich adsorption isotherm for phosphorus sorption of soil // *Soil Sci.* 1979. V. 128. No. 2. P. 65–69.

### References

1. Reshetnikov S.M., Makarova L.L., Kornev V.I., Ionov L.B., Pletnev M.A. Results of studies of soils and reservoirs in the 30 kilometer zone of the city Kambarka on the maintenance of arsenic and some heavy metals // *Vestnik Udmurtskogo universiteta.* 1994. Spetsvyпуск. V. 3. P. 109–121 (in Russian).

2. Shumilova M.A. The content of heavy metals in the soils of Kambar district // *Vestnik KIGIT.* 2014. No. 10 (52). P. 33–42 (in Russian).

3. Kurguzkin M.G., Frizorger G.G. Specific peculiar properties and scope of work performed Regional Centre of the National Ecological Control and Monitoring (the RC NEC & M) of UR by within the framework of ensuring maintenance of the system of state environmental control and monitoring of the work of the chemical weapons storage and destruction plants of UR // *Chemical disarmament 2009: results and aspects of technological solutions, ecoanalytical control and medical monitoring "CHEMDET-2009": Sbornik trudov III Vserossiyskoy konferentsii s mezhdunarodnym uchastiem.* Izhevsk: IPM UrO RAN, 2009. P. 142–149 (in Russian).

4. Ryzhenko B.N., Cherkasova Ye.V., Limantseva O.A. The formation model of groundwater contamination with arsenic. 2. The influence of sorption // *Geokhimiya.* 2009. No. 10. P. 1041–1049 (in Russian).

5. GOST 17.4.3.01-83. Nature Conservancy. Soils. General requirements for sampling. Moskva: IPK Izd-vo Standartov, 2004. 4 p. (in Russian).

6. GOST 28168-89. Sampling. Moskva: Standartin-form, 2008. 7 p. (in Russian).

7. Arinushkina E.V. Guide to chemical analysis of soil. Moskva: Izd-vo MGU. 1970. 487 p. (in Russian).

8. M-03-505-119-03. Methods of quantitative chemical analysis. Determination of metals in drinking, mineral, natural, waste water and precipitation by atomic absorption method. Sankt-Petersburg: 2005. 28 p. (in Russian).

9. Langmuir I. The constitution and fundamental properties of solids and liquids // *J. Am. Chem. Soc.* 1916. V. 38. No. 11. P. 2221–2295.

10. Frolov Yu.G. Course of Colloid Chemistry. Surface phenomena and disperse systems. M.: Khimiya. 1988. 464 p. (in Russian).

11. Rouquerol J., Rouquerol F., Sing R.S.W. Adsorption by powders and porous solids: principles, methodology and application. Academic Press: London – San-Diego, 1999. 467 p.

12. Shumilova M.A., Petrov V.G. Adsorption of arsenite-ion by some soils of Udmurtia // *Teoreticheskaya i prikladnaya ekologiya.* 2016. No. 4. P. 56–62 (in Russian).

13. Nikiforova T.Ye. Physico-chemical basis of chemisorption of d-metal ions by modified cellulose-containing materials: Diss. ... dokt. khim. nauk. Ivanovo, FGBOU VPO IGKHTU. 2014. 365 p. (in Russian).

14. Hubbe M.A., Hasan S.H., Ducoste J.J. Cellulosic substrates for removal of pollutants from aqueous systems: a review. 1. Metals // *BioResources.* 2011. V. B (2). P. 2181–2287.

15. Ghorai Subhashini, Pant K.K. Equilibrium, kinetics and breakthrough studies for adsorption of fluoride on activated alumina // *Separation and Purification Technology.* 2005. V. 42. P. 265–271.

16. Dubinin M.M., Radushkevich L.V. On the equation of the characteristic curve for active coals // *Dokl. AN SSSR.* 1947. V. 55. P. 331–334 (in Russian).

17. Dubinin M.M., Zaverina E.D., Radushkevich L.V. Modern state of the theory of the volume filling of micropores of carbon adsorbents // *ZhFCh.* 1991. No. 1. P. 9–30 (in Russian).

18. Shchukin Ye.D., Pertsov A.V., Amelina Ye.A. Colloid Chemistry. M.: Vysshaya shkola, 2004. 445 p. (in Russian).

19. Nikiforova T.E., Kozlov V.A., Rodionova M.V., Modina E.A. Sorption of zinc ions by products containing cellulose and protein components // *Izvestiya vuzov. Khimiya i khimicheskaya tekhnologiya.* 2009. T. 52. V. 3. P. 27–31 (in Russian).

20. Dalal R.C. Application of Dubinin-Radushkevich adsorption isotherm for phosphorus sorption of soil // *Soil Sci.* 1979. V. 128. No. 2. P. 65–69.

УДК: 544.723.23: 661.642.5

## Контроль эффективной работы системы очистки выбросов по составу отходов

© 2017. С. А. Шаров аспирант,  
Т. Я. Ашихмина<sup>1,2</sup>, д. т. н., профессор, зав. кафедрой, зав. лабораторией,  
<sup>1</sup>Вятский государственный университет,  
610000, Россия, г. Киров, ул. Московская, д. 36,  
<sup>2</sup>Институт биологии Коми НЦ УрО РАН,  
167982, Россия, Республика Коми, г. Сыктывкар, ул. Коммунистическая, 28,  
e-mail: ecolab2@gmail.com, sharky2007.doost@mail.ru

Современное развитие технологий очистки газов позволяет обеспечить уровень очистки по отдельным веществам до 99%, однако помимо внедрения новых технологий, необходимо осуществление действенного контроля за полноценным функционированием уже существующих установок очистки газов. Существующая методика проверок предприятий, на которых отсутствуют автоматические газосигнализаторы, позволяет оценить состояние и эффективность работы систем очистки только в текущий момент времени. Для исследования динамики работы очистных установок на протяжении длительного периода необходим перекрёстный поэлементный контроль между компонентами исходного сырья и конечными отходами после очистки воздуха. Решение данной задачи возможно посредством балансового сравнения количеств и состава исходного сырья и конечных отходов. Наиболее эффективен предлагаемый метод для контроля объёма и состава фактического выброса котельных, ТЭС, ТЭЦ. В данной работе контроль эффективной работы системы очистки выбросов по составу отходов рассмотрен на примере работы печей по сжиганию реакционной массы зомана на объекте по уничтожению химического оружия. Балансовым методом по массовой доле фосфора в составе молекулы зомана и в составе фосфорсодержащих отходов проведена оценка величины выброса фосфорсодержащих веществ после проведения всех стадий уничтожения зомана. Сделан вывод о том, что при уничтожении зомана произошло достаточно полное окисление фосфорорганических веществ до  $P_2O_5$  в ходе сжигания реакционных масс, с дальнейшим осаждением соединений фосфора в избытке известкового молочка, и на рукавных фильтрах, в процессе которых степень очистки составила 99%. Выброс фосфорсодержащих соединений в пересчёте на атомарный фосфор в течение всего периода уничтожения зомана на объекте составил 0,43 т. Сравнивая полученную цифру с данными по выбросу фосфорсодержащих веществ в ПДВ, можно сделать вывод о соответствии выбросов завода установленному разрешению на выброс.

При установлении факта неэффективной работы установок очистки газов данный подход позволяет оценить динамику загрязнения во времени, установить объём фактического выброса загрязняющих веществ в атмосферу, с высокой точностью моделировать загрязнение окружающей среды, что, в свою очередь, позволяет оценить реальный экологический ущерб.

**Ключевые слова:** установка очистки газа, контроль эффективного функционирования, отходы после очистки газов, экологический ущерб.

## Monitoring the effective operation of the emission cleaning system by waste composition

S. A. Sharov<sup>1</sup>, T. Ya. Ashikhmina<sup>1,2</sup>,  
<sup>1</sup>Vyatka State University,  
36 Moskovskaya St., Kirov, Russia, 610000,  
<sup>2</sup>Institute of Biology of the Komi Science Centre of the Ural Division RAS,  
28 Kommunisticheskaya St., Syktyvkar, Komi Republic, Russia, 167982,  
e-mail: ecolab2@gmail.com, sharky2007.doost@mail.ru

Modern development of gas cleaning technologies allows providing a level of purification for individual substances up to 99%, but in addition to introduction of new technologies, it is necessary to implement effective control over the full operation of existing gas purification plants. The current method of inspecting enterprises that do not have automatic gas detectors allows assessing the state and efficiency of cleaning systems only at the current time, for examination the dynamics of the operation of treatment plants over a long period, cross-control between the components of the feedstock and the final waste after air purification is necessary. The solution of this problem is possible by means of a balance comparison of the quantities

and composition of the feedstock and the final waste. The proposed method is most effective for controlling the volume and composition of actual emission of boiler houses, thermal power plants, and thermal power stations.

In this paper, control over efficient operation of the waste treatment system for the waste composition is considered using the example of the operation of furnaces for burning the reaction mass of soman at the chemical weapons destruction facility. The balance method for the mass fraction of phosphorus in the composition of the molecule of soman and in the composition of phosphorus-containing waste was used to estimate the amount of phosphorus-containing substances released after carrying out all stages of destruction of soman. It was concluded that in the process of soman destroying, the organophosphorus compounds were sufficiently oxidized to  $P_2O_5$  during the combustion of reaction masses, with further sedimentation of phosphorus compounds in excess of lime milk, and on bag filters, during which the purification rate was 99%. The release of phosphorus-containing compounds in terms of atomic phosphorus during the entire destruction of soman at the site was 0.43 tons. Comparing this figure of emission of phosphorus-containing substances with the draft of allowable emissions, it can be concluded that the plant's emissions correspond to the established emission permission.

When establishing the fact of ineffective operation of gas purification plants, this approach allows estimating the dynamics of pollution over time, determining the amount of actual emission of pollutants into the atmosphere, and modeling pollution of the environment with high accuracy, which in turn makes it possible to estimate actual environmental damage.

**Keywords:** gas cleaning device, effective control of operation, waste gases purification, environmental damage.

Применение газоочистных установок (ГОУ), их постоянное совершенствование является неотъемлемой и весьма действенной частью комплекса мероприятий, направленных на охрану атмосферного воздуха как в нашей стране, так и за рубежом [1–4]. Современные системы очистки газов в любых производствах позволяют осуществлять действенную очистку по некоторым параметрам до 99% [5]. Параметры ГОУ учитываются при утверждении разрешения на выброс загрязняющих веществ, а значит применение ГОУ на предприятиях ведёт к уменьшению платежей за негативное воздействие. Наличие современных ГОУ в проектах на строительство новых предприятий приветствуется при проведении всех уровней экспертиз и обсуждений проектных документаций, что, в свою очередь, побуждает вкладывать средства в приобретение и использование в производствах самых современных установок. Применение методов административного воздействия в процессе государственного контроля также создаёт благоприятную среду для принятия всех возможных мер по снижению нагрузки на атмосферный воздух посредством использования ГОУ.

Возникает вопрос: как проверить, что рабочая, современная, эффективная установка находится в работе в течение всего технологического процесса, при этом своевременно производится замена фильтров, растворов, катализаторов, применяются качественные поглотители, что в целях экономии или просто ввиду некомпетентности персонала ГОУ не отключена и работает эффективно на протяжении всего периода эксплуатации, а не от проверки к проверке [6]? Цель настоящей работы заключается в необходимости разработки способа непрерывного контроля соблюдения заданных параметров работы газоочистного оборудования, а также

в получении данных об объёме фактического выброса загрязняющих веществ за длительный период работы технологической линии.

При решении поставленной цели предложено применение балансового метода расчёта объёмов и состава выбросов исходя из сравнения качественного и количественного состава исходного сырья и образовавшихся отходов после работы системы очистки газов.

### Объекты и методы

В соответствии с материалами [7], в ходе проверок индивидуальных предпринимателей и юридических лиц в основном проверяются документы собственного производственного контроля предприятия, а также производятся замеры текущих параметров выбросов на источниках загрязнения атмосферы в текущий момент времени [8]. Это не позволяет судить о динамике выбросов на протяжении предшествующих проверке периодов, а значит – и о постоянном эффективном использовании очистных установок. В черте города, в условиях взаимного влияния производственных объектов, невозможно достоверно разграничить источники загрязнения окружающей среды [9], даже при наличии явных следов загрязнения на природных объектах, и тем более оценить степень загрязнения сверх установленных нормативов от конкретного предприятия.

Регламентированное вычисление степени очистки газов [10] осуществляется контролем массы поступающего вещества и выходом этого же вещества после очистки.

$$\eta = \frac{M_{ул}}{M_{вх}} = \frac{M_{вх} - M_{выл}}{M_{вх}} = \frac{C_{вх}Q_{вх} - C_{выл}Q_{выл}}{C_{вх}Q_{вх}} = 1 - \frac{C_{выл}Q_{выл}}{C_{вх}Q_{вх}}$$

где  $M_{ул}$ ,  $M_{вх}$ ,  $M_{вых}$  – соответственно количество уловленного в аппарате, входящего и выходящего из аппарата загрязняющих веществ (ЗВ), кг/с;  $C_{вх}$ ,  $C_{вых}$  – концентрация ЗВ в единице объема сухого газа соответственно на входе и выходе из аппарата, г/м<sup>3</sup>;  $Q_{вх}$ ,  $Q_{вых}$  – объём газа соответственно на входе и выходе из аппарата, м<sup>3</sup>.

В ситуации, когда в технологической линии, ввиду технических причин, произошёл сбой и не осуществлено, например, полное окисление исходного сырья до веществ, улавливаемых ГОУ, эффективность установки по заданным веществам не будет поставлена под сомнение, но в атмосферу поступит загрязняющее вещество. В данной работе рассматривается метод количественной оценки фактических выбросов. Суть метода основана на том, что при сгорании или обжиге химических веществ и переходе их в другие соединения, суммарная масса атомов этих веществ в выбросах и в оставшихся после сжигания отходах должна оставаться постоянной, что также будет свидетельствовать о полноте окисления. При этом из среды проведения реакции вещества могут только выпасть в осадок, осесть на фильтре или улечься в атмосферу.

### Результаты и их обсуждение

Предлагаемый метод рассмотрен на примере работы печей по сжиганию реакционной массы зомана на объекте по уничтожению химического оружия. На объектах уничтожения химического оружия в Российской Федерации была реализована двухстадийная технология уничтожения фосфорорганических отравляющих веществ. На первой стадии детоксикации происходила химическая дегазация отравляющих веществ с образованием менее токсичных реакционных масс, на второй стадии про-

дилось сжигание реакционных масс. Система очистки отходящих дымовых газов в печах сжигания реакционных масс состоит из двух ступеней. На первой ступени в полых прямоточных скрубберах происходит обработка дымовых газов 20% суспензией гидроксида кальция и после «полусухой абсорбции» газообразных примесей. Образовавшиеся при этом твёрдые частицы частично осаждаются в реакторе, а частично уносятся вместе с дымовыми газами во вторую ступень очистки в рукавные фильтры. В рукавных фильтрах завершается процесс очистки от взвешенных частиц и очищенные дымовые газы отводятся в дымовую трубу [11].

При этом следует отметить, что в ходе детоксикации зомана фосфорсодержащие соединения дополнительно не вводились в среду реакции, поэтому в замкнутой системе химических превращений зомана атомы фосфора не привносились, контроль же исходного сырья и полноты уничтожения химического оружия осуществлялся как собственными производственными лабораториями, так и под контролем иностранных наблюдателей. Это позволяет судить о высокой достоверности данных контроля качественного и количественного состава на всех стадиях уничтожения отравляющих веществ.

Таким образом, можно вычислить массовую долю фосфора в составе молекулы зомана и в составе фосфорсодержащих отходов, а затем балансовым методом оценить величину выброса фосфорсодержащих веществ после проведения всех стадий уничтожения зомана.

Молекулярная масса зомана 182,17 г/моль, а массовая доля атомарного фосфора в данном веществе составляет 0,17 масс. д. или 17%. Если принять, что на объекте по уничтожению химического оружия хранилось 275 т зомана, то во всём запасе зомана содержалось 46,75 т в пересчёте на атомарный фосфор.

Таблица

Состав отходов, образовавшихся при сжигании реакционной массы от детоксикации зомана [11]

Наименование компонента	Место отбора объединённой пробы солевых отходов	
	скруббер	рукавный фильтр
	содержание компонентов, %	
Ca(OH) <sub>2</sub>	2,2	–
CaCO <sub>3</sub>	13,2	5,2
Ca <sub>3</sub> (PO <sub>4</sub> ) <sub>2</sub>	55,1	86,1
CaF <sub>2</sub>	0,03	0,03
CaSO <sub>4</sub>	26	5
Водорастворимые соли калия	0,3	0,3
Примеси	3,17	3,37

При сжигании реакционной массы зомана по данным [11] образовывались отходы от «полусухой абсорбции» дымовых газов непосредственно в скруббере и при осаждении взвешенных веществ рукавными фильтрами. Состав отходов приведен в таблице.

Допустим, масса отходов от сжигания реакционных масс зомана после скруббера составила 225 т, а после рукавного фильтра – 125 т. В состав отходов фосфор входил только в фосфат кальция, доля которого в отходах после скруббера составляла 55,1%, т.е. чистого фосфата кальция содержалось 123,975 т, в отходах после рукавного фильтра – 86,1%, чистого фосфата кальция – 107,625 т. Всего в отходах масса фосфата кальция составила 231,6 т.

Для определения содержания маркирующего элемента фосфора в фосфате кальция находим массовую долю атомарного фосфора в фосфате кальция (0,2 масс. д. или 20%). Затем вычисляем массу фосфора во всем объеме фосфата кальция, т. е. в 231,6 т образовавшихся от сжигания реакционных масс зомана содержится 46,32 т фосфора.

Таким образом, при уничтожении зомана произошло достаточно полное окисление фосфорорганических веществ до  $P_2O_5$  в ходе сжигания реакционных масс, с дальнейшим осаждением в избытке известкового молочка, и на рукавных фильтрах степень очистки составила  $46,32/46,75 = 99\%$ , то есть выброс фосфорсодержащих соединений в пересчете на атомарный фосфор в течение всего периода уничтожения зомана на объекте составил 0,43 т. Сравнивая полученную цифру с данными по выбросу фосфорсодержащих веществ с ПДВ, можно сделать вывод о соответствии выбросов завода установленному разрешению на выброс.

При уменьшении концентрации известкового молока или в его отсутствие, а также при несвоевременном обслуживании рукавных фильтров по количественному и качественному составу отходов можно оценить эффективность работы системы очистки выбросов. Для этого необходимо аналогично сравнивать массы атомов и веществ, вступающих в реакцию, и отходов. Это даёт возможность судить о массе уноса веществ с воздушным потоком, что позволит определить эффективность работы технологической линии в целом и построить модель реального загрязнения атмосферы в районе действия предприятия.

Погрешность данного метода напрямую связана с погрешностью измерений количества исходного сырья, поступившего в

технологический процесс и взвешиванием образовавшихся отходов, а также с точностью определения компонентных составов веществ.

Приведённые в статье значения количества и состава отходов являются примерными и используются только в качестве примера расчёта, по которым можно оценить экологическую безопасность деятельности любого предприятия и действующих на нём газоочистных установок.

### Заключение

Рассматриваемый нами метод призван не только оценить эффективность долговременной работы ГОУ, но также ставит вопросы перед предприятиями о своевременном осуществлении контроля состава отходов для подтверждения неизменности технологических процессов, по использованию только качественного сырья и, что очень важно, быть заинтересованными в качественном учёте отходов. При установлении факта неэффективной работы ГОУ данный подход позволяет оценить динамику загрязнения во времени, установить объём фактического выброса загрязняющих веществ в атмосферу, что, в свою очередь, при корреляции с базой метеоданных, даст возможность выявить локальные очаги воздействия конкретного источника загрязнения [12] и оценить реальный экологический ущерб.

*Работа выполнена 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. Бекетов В.Е., Евтухова Г.П. Прикладная аэроэкология. Харьков: Изд-во ХНУГХ, 2013. 64 с.
2. Ветошкин А.Г. Процессы и аппараты газоочистки: учеб. пособие. Пенза: Изд-во ПГУ, 2006. 201 с.
3. Weinstein M., Krasnik I.M., Durable C.D. Industrial and sanitary clearing of gases // Industrial and Sanitary Gas Cleaning. 1977. No. 5. P. 3–14.
4. Ondrey G. Progress to limit climate change // Chemical Engineering. 2016. No. 1. P. 16–19.
5. Исхаков А.Р., Лаптев А.Г. Эффективность абсорбции в полых распыливающих аппаратах // Вестник технологического университета. 2015. Т. 18. № 18. С. 77–79.

6. Liping M., Ping N., Yuanyuan Z., XueQian W. Experimental and modeling of fixed-bed reactor for yellow phosphorous tail gas purification over impregnated activated carbon // *Chemical Engineering Journal*. 2008. No. 3. P. 471–479.

7. Методическое пособие по расчёту, нормированию и контролю выбросов загрязняющих веществ в атмосферный воздух (введено письмом Ростехнадзора от 24.12.2004 N 14-01-333) [Электронный ресурс] [http://www.consultant.ru/document/cons\\_doc\\_LAW\\_146580](http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_146580) (Дата обращения 16.10.2017).

8. Liang S.H., Wang Y.J., Zhu S.S., Technical study on building gas real-time monitoring system based on Ajax and ArcIMS // *Frontiers of Energy and Environmental Engineering*. 2013. P. 618–620.

9. Martínez Torres J., Garcia Nieto P.J., Alejano L., Reyes A.N. Detection of outliers in gas emissions from urban areas using functional data analysis // *Journal of Hazardous Materials*. 2011. P. 144–149.

10. Правила эксплуатации установок очистки газа (утв. Минхиммашем СССР 28.11.1983) (вместе с «Инструкцией по заполнению паспорта установки очистки газа») [Электронный ресурс] [http://www.consultant.ru/document/cons\\_doc\\_LAW\\_121235](http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_121235) (Дата обращения 16.10.2017).

11. Кондратьев В.Б., Корольков М.В., Костикова Н.А., Рысюк Л.Н. Шибков О.О. Методологические подходы к переработке солевых отходов, образующихся при термическом обезвреживании реакционных масс от фосфорорганических отравляющих веществ на объектах по уничтожению химического оружия // *Теоретическая и прикладная экология*. 2011. № 4. С. 37–38.

12. Trigilio A., Bouza A., Scipio S. Modelling and simulation of natural gas liquefaction process // *Advances in Natural Gas Technology*. 2016. No. 2. P. 213–233.

## References

1. Beketov V.E., Evtukhova G.P. Applied aerology. Kharkov: Izd-vo KhNUGKh. 2013. 64 p. (in Russian).

2. Vetoshkin A.G. Processes and devices for gas cleaning; textbook. Penza: Izd-vo PGU. 2006. 201 p. (in Russian).

3. Weinstein M., Krasnik I.M., Durable C.D. Industrial and sanitary clearing of gases // *Industrial and Sanitary Gas Cleaning*. 1977. No. 5. P. 3–14.

4. Ondrey G. Progress to limit climate change // *Chemical Engineering*. 2016. No. 1. P. 16–19.

5. Iskhakov A.R., Laptev A.G. Absorption efficiency in hollow sprayers // *Vestnik tekhnologicheskogo universiteta*. 2015. No. 18. P. 77–79 (in Russian).

6. Liping M., Ping N., Yuanyuan Z., XueQian W. Experimental and modeling of fixed-bed reactor for yellow phosphorous tail gas purification over impregnated activated carbon // *Chemical Engineering Journal*. 2008. No. 3. P. 471–479.

7. “Methodological manual for calculating, rationing and controlling emissions of pollutants into the atmosphere” (introduced by a letter of Rostekhnadzor from 24.12.2004 N 14-01-333) [Internet resource] [http://www.consultant.ru/document/cons\\_doc\\_LAW\\_146580](http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_146580) (Accessed: 16.10.2017) (in Russian).

8. Liang S.H., Wang Y.J., Zhu S.S., Technical study on building gas real-time monitoring system based on Ajax and ArcIMS // *Frontiers of Energy and Environmental Engineering*. 2013. P. 618–620.

9. Martínez Torres J., Garcia Nieto P.J., Alejano L., Reyes A.N. Detection of outliers in gas emissions from urban areas using functional data analysis // *Journal of Hazardous Materials*. 2011. P. 144–149.

10. Rules for the operation of gas purification plants (approved by the Ministry of Chemical Industry of the USSR on 28.11.1983) (together with the “Instruction for filling the passport of the gas treatment plant”) [Internet resource] [http://www.consultant.ru/document/cons\\_doc\\_LAW\\_121235](http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_121235) (Accessed: 16.10.2017) (in Russian).

11. Kondratyev V.B., Korolkov M.V., Kostikova N.A., Rysyuk L.N. Shибков O.O. Methodological approaches to processing salt wastes formed during thermal neutralization of reactionary masses from organophosphorus poison agents at chemical weapons destruction plants // *Teoreticheskaya i prikladnaya ekologiya*. 2011. No. 4. P. 37–38 (in Russian).

12. Trigilio A., Bouza A., Scipio S. Modelling and simulation of natural gas liquefaction process // *Advances in Natural Gas Technology*. 2016. No. 2. P. 213–233.

## Некоторые аспекты комплексного подхода к обоснованному выбору технологии ликвидации опасных и токсичных промышленных отходов

© 2017. В. П. Капашин<sup>1</sup>, д. т. н., начальник,  
В. Г. Мандыч<sup>1</sup>, к. т. н., заместитель начальника управления,  
В. А. Воронин<sup>2</sup>, к. т. н., начальник,  
Т. В. Воробьев<sup>2</sup>, к. х. н., зам. начальника,  
И. В. Коваленко<sup>2</sup>, к. т. н., с. н. с.,  
А. В. Глазков<sup>1</sup>, начальник группы,  
<sup>1</sup>Федеральное управление по безопасному хранению  
и уничтожению химического оружия,  
115487, Россия, г. Москва, ул. Садовники, 4-а,  
<sup>2</sup>Научно-исследовательский центр Федерального управления  
по безопасному хранению и уничтожению химического оружия,  
115487, Россия, г. Москва, ул. Садовники, 4-а,  
e-mail: fubhuho@mail.ru

В статье рассматриваются проблемные аспекты ликвидации отходов от деятельности производств химической продукции, содержащие токсичные вещества, которые размещались как на специально созданных полигонах, так и на несанкционированных (неорганизованных) территориях.

Сложный состав жидких промышленных отходов, накопление которых в огромных объёмах осуществлялось продолжительное время, отсутствие точных данных о веществах, содержащихся в жидких промышленных отходах, и токсикологических характеристиках этих отходов предопределяют комплекс сложных, взаимосвязанных и продолжительных по времени мероприятий, направленных на решение проблемы ликвидации опасных и токсичных промышленных отходов.

В статье впервые предлагается осуществить выбор, разработку и создание наиболее надежных, безопасных и высокоэффективных технологий ликвидации опасных и токсичных промышленных отходов на основе опыта конкурсной оценки технологий уничтожения отравляющих веществ.

Проблема ликвидации опасных и токсичных промышленных отходов схожа по своей сути с проблемой уничтожения запасов химического оружия, но имеет ряд отличительных особенностей: объёмы жидких отходов по объёму многократно превышают запасы отравляющих веществ; отравляющие вещества находились в оболочках или ёмкостях, а жидкие отходы, как правило, не изолированы и в открытом состоянии находятся на неорганизованных свалках или полигонах; при хранении химического оружия исключалось попадание отравляющих веществ в окружающую среду или их воздействие на объекты окружающей среды было максимально минимизировано (за исключением возможных аварийных ситуаций); открытый способ хранения жидких отходов является источником непрерывного негативного воздействия на объекты окружающей среды; физико-химические и токсикологические свойства отравляющих веществ до начала подготовки к уничтожению химического оружия были известны и использованы при предварительной обработке предполагаемых технологий детоксикации отравляющих веществ; физико-химические и токсикологические свойства жидких отходов, которые могут оказать влияние на выбор или разработку тех или иных технологий их обезвреживания или ликвидации, не известны и требуют отдельного изучения.

Для конкурсного отбора приоритетных технологий ликвидации опасных и токсичных промышленных отходов в статье предлагаются основные критерии (безопасность, экологическая чистота, техническое совершенство, ресурсоёмкость, экономическая приемлемость, степень отработанности технологических процессов на реальных средах) и групповые требования.

В статье предлагается предусматривать выполнение научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ, в которых отобранные технологии получают реализацию в виде конкретных опытных образцов специального оборудования и технологических линий. Результаты выполненных исследований и конструкторских работ должны стать основой для разработки технико-экономического обоснования строительства и соответствующей проектной документации объектов по ликвидации опасных и токсичных промышленных отходов.

**Ключевые слова:** конкурсный отбор, ликвидация отходов, обезвреживание отходов, промышленные отходы, токсичные отходы, уничтожение отходов.

## Some aspects of an integrated approach to the justified choice of technology for the elimination of hazardous and toxic industrial wastes

V. P. Kapashin<sup>1</sup>, V. G. Mandich<sup>1</sup>, V. A. Voronin<sup>2</sup>,  
T. V. Vorob`ev<sup>2</sup>, I. V. Kovalenko<sup>2</sup>, A. V. Glazkov<sup>1</sup>,

<sup>1</sup>Federal Directorate for Safe Storage and Destruction of Chemical Weapons,  
4a St. Sadovniki, Moscow, Russia, 115487,

<sup>2</sup>Research and Development center of the Federal Directorate  
for Safe Storage and Destruction of Chemical Weapons,  
4a St. Sadovniki, Moscow, Russia, 115487,  
e-mail: fubhuho@mail.ru

The article deals with the problematic aspects of waste disposal from chemical enterprises that contain toxic substances which were placed both on specially created landfills and on unauthorized (unorganized) territories.

The complex composition of liquid industrial waste which has been accumulating in huge volumes for a long time, lack of accurate data on the substances contained in liquid industrial waste and on their toxicological characteristics predetermine a complex of interrelated and long-term measures aimed at solving the problem of eliminating hazardous and toxic industrial waste.

For the first time in the article it is proposed to select, develop and create the most reliable, safe and highly efficient technologies for elimination of hazardous and toxic industrial wastes based on the experience of complex assessment of technologies for toxic substances destruction.

The problem of elimination of hazardous and toxic industrial waste is similar in its essence to the problem of destruction of stockpiles of chemical weapons, but has a number of distinctive features: the volume of liquid waste many times exceeds the stocks of poisonous substances; poisonous substances are in shells or containers, and liquid wastes, as a rule, are not isolated and are in an open state on unorganized dumps or landfills; when storing chemical weapons, the entry of toxic agents into the environment was excluded or their impact on the objects of the environment was minimized (except for possible emergency situations); an open method of storing liquid waste is a source of continuous negative impact on environmental objects; physicochemical and toxicological properties of chemical agents were known and used in preliminary testing of the alleged detoxification technologies prior to the commencement of preparations for chemical weapons destruction; physicochemical and toxicological properties of liquid wastes that may influence the choice or development of certain technologies for their neutralization or elimination are not known and require separate study.

For competitive selection of priority technologies for elimination of hazardous and toxic industrial wastes, the main criteria (safety, environmental cleanliness, technical excellence, resource intensity, economic acceptability, degree of workflow of technological processes in real environments) and group requirements are proposed in the article.

The article offers to provide implementation of research and development work, in which selected technologies will be realized in the form of specific prototypes of special equipment and technological lines. The results of the research and design work should be the basis for development of a feasibility study for construction and relevant design documentation of the disposal of hazardous and toxic industrial wastes plants.

**Keywords:** competitive selection, waste disposal, waste neutralization, industrial waste, toxic waste, waste disposal.

Проблемы, связанные с обращением, утилизацией, обезвреживанием и захоронением отходов производства и потребления, характерны для всех индустриально развитых государств.

Федеральным законодательством Российской Федерации установлено, что основными направлениями государственной политики в области обращения с отходами являются: максимальное использование исходных сырья и материалов; предотвращение образования отходов; сокращение образования отходов и снижение класса опасности отходов в источниках их образования; обработка отходов; утилизация отходов; обезвреживание отходов [1].

Интенсивное социально-экономическое развитие страны в предшествующий период, процессы интенсивной индустриализации, плотность промышленного производства, накопление загрязняющих веществ преимущественно в почвах (землях) с учётом биогеохимических процессов и депонирующих свойств указанного природного объекта и ряд других факторов стали основными причинами

возникновения накопленного экологического ущерба.

В результате хозяйственной деятельности к настоящему времени в Российской Федерации накоплено около 32 млрд т отходов, из которых около 2,5 млрд т являются токсичными. Указанные объекты занимают значительные площади земель, опасные химические вещества попадают в грунтовые воды, что приводит к загрязнению поверхностных и подземных водных объектов, в том числе источников водоснабжения, и к нарушению геохимического баланса территорий.

Спецификой локализации накопленного экологического ущерба в Российской Федерации является территориальное распределение промышленного комплекса страны с учётом географических и природоресурсных аспектов, связанных с размещением горнодобывающей, тяжёлой и перерабатывающей промышленности, военно-промышленного комплекса.

В настоящее время производственные мощности и/или находящиеся в публичной

собственности загрязнённые земельные участки, на которых располагались промышленные площадки бывших химических производств, представляют собой загрязнённые токсичными веществами территории с полуразрушенными корпусами и шламонакопителями с токсичными отходами.

Особую озабоченность вызывают отходы от деятельности производств химической продукции и содержащие токсичные вещества, которые размещались как на специально созданных полигонах, так и на несанкционированных (неорганизованных) территориях. Условия их размещения не соответствуют принятым нормам промышленной и экологической безопасности, что оказывает негативное воздействие на обширные по площади прилегающие территории.

К числу таких объектов негативного экологического влияния относятся неорганизованная свалка промышленных отходов «Чёрная дыра» в Нижегородской области и полигон «Красный Бор» в Ленинградской области.

Объём жидких, пастообразных и твёрдых отходов в неорганизованной свалке промышленных отходов «Чёрная дыра» оценивается в 70000 т. Промышленные отходы поступали от бывшего производства ОАО «Оргстекло». Основными загрязнителями являются полимерные и хлорорганические остатки, а также соединения, содержащие мышьяк, свинец и кадмий.

Полигон «Красный Бор», с точки зрения негативного экологического влияния, является наиболее актуальным.

Данный полигон с 1969 по 2014 г. являлся основным местом конечного размещения промышленных токсичных отходов предприятий Санкт-Петербурга, Ленинградской области и ряда других регионов Российской Федерации. До 1992 г. на полигоне также складировались отходы из прибалтийских республик СССР [2, 3].

На сегодняшний день на полигоне накоплено около 700 тыс. тонн жидких промышленных токсичных отходов различного класса опасности с чрезвычайно разнородным составом, также на территории предприятия находятся порядка 3 млн т загрязнённых промышленными отходами грунтов. Наибольшую экологическую опасность представляют пять карт-котлованов, которые остаются открытыми до настоящего времени [2, 3].

В двух наиболее крупных картах находятся жидкие органические (нефтепродукты, ор-

ганические растворители, хлорорганические соединения) и твёрдые (загрязнённая тара, другие твёрдые) отходы, а в трёх остальных картах – жидкие гальванические и неорганические (кислоты, щелочи) отходы [2, 3].

Необходимо понимать, что решение проблемы ликвидации опасных и токсичных промышленных отходов (ОТПО) – это комплекс сложных, взаимосвязанных и продолжительных по времени мероприятий.

В целом постановка проблемы ликвидации ОТПО схожа по своей сущности с проблемой уничтожения запасов химического оружия (ХО).

Отличительными особенностями проблемы ликвидации ОТПО являются:

- объёмы жидких ОТПО многократно превышают запасы ХО (по объёму содержащихся отравляющих веществ – ОВ);
- ОВ находились в оболочках или ёмкостях, а жидкие ОТПО, как правило, не изолированы и в открытом состоянии находятся на неорганизованных свалках или полигонах;
- при хранении ХО попадание ОВ в окружающую среду или их воздействие на объекты окружающей среды было максимально минимизировано (за исключением возможных аварийных ситуаций);
- открытый способ хранения жидких ОТПО – это источник непрерывного негативного воздействия на объекты окружающей среды;
- физико-химические и токсикологические свойства ОВ до начала подготовки к уничтожению ХО были известны и использованы при предварительной отработке предполагаемых технологий детоксикации ОВ;
- физико-химические и токсикологические свойства жидких ОТПО, которые могут оказать влияние на выбор или разработку тех или иных технологий их обезвреживания или ликвидации, не известны и требуют отдельного изучения.

В связи с этим важным аспектом является выбор, разработка и создание наиболее надёжных, безопасных и высокоэффективных технологий ликвидации ОТПО с учётом конкретных сведений о физико-химических и токсикологических свойствах.

При выборе технологий целесообразно принять во внимание опыт по конкурсной оценке технологий уничтожения ОВ, которая осуществлялась в преддверии решения проблемы уничтожения ХО [4, 5].

Основными критериями при отборе приоритетных технологий ликвидации ОТПО могут быть: безопасность, экологическая чистота, техническое совершенство, ресурсоёмкость, экономическая приемлемость, степень отработанности технологических процессов на реальных средах.

К технологиям ликвидации ОТПО на этапе отбора целесообразно сформулировать групповые требования.

### **Требования по безопасности к технологиям ликвидации ОТПО**

1. Требования по взрывобезопасности призваны исключить возможность использования взрывоопасных веществ в технологическом процессе, возможность мгновенного выделения большого количества энергии (достаточного для разрушения оборудования и сооружений) в ограниченных объёмах, возможность образования вторичных взрывоопасных веществ.

2. Требования по пожаробезопасности призваны исключить возможность использования горючих веществ (газов, жидкостей, пыли, твёрдых материалов) и окислителей (кислород, галогены) в технологическом процессе; возможность использования и образования источников возгорания; возможность возгорания вторичных пожароопасных веществ.

3. Требования по электробезопасности призваны исключить возможность образования в ходе технологического процесса источников электрического тока, электрической дуги, электромагнитного поля и статического электричества.

4. Требования по химической безопасности призваны исключить возможность пролива и утечек ОТПО в технологических процессах их ликвидации.

5. Полнота ликвидации ОТПО. Технология должна обеспечивать необходимую степень или полную ликвидацию ОТПО.

6. Безаварийность. Технология должна исключать возможность возникновения аварий в случае непреднамеренных (молния, землетрясение, наводнение, падение летательного аппарата и т.п.) и преднамеренных (несоблюдение правил эксплуатации оборудования, несоблюдение правил техники безопасности, ошибочные действия обслуживающего персонала и т.п.) внешних воздействий.

7. Риск. Технология должна исключать возможность человеческих жертв как среди обслуживающего персонала, так и среди населения, проживающего вблизи мест предполагаемой ликвидации ОТПО в случае воз-

никновения аварийных ситуаций (пожар, взрыв, пролив и утечка ОТПО, внешние воздействия).

Реализация требований по безопасности должна достигаться: сокращением числа стадий ликвидации ОТПО и использованием устойчивых технологических процессов; заменой токсичных, взрыво- и пожароопасных веществ менее вредными и опасными; выбором безопасных элементов конструкций технологических линий; применением средств механизации трудоёмких, опасных и вредных работ, автоматизации, дистанционного управления, блокировки, защиты; выполнением эргономических требований для системы «человек-машина» путём согласования конструкций оборудования с возможностями человека.

### **Экологические требования к технологиям ликвидации ОТПО**

1. Наличие отходов. Технология должна или исключать, или сводить к минимуму возможность образования новых (или сопутствующих) газообразных, жидких и твёрдых отходов.

2. Класс опасности отходов. Технология должна обеспечивать ликвидацию ОТПО до минимального класса опасности.

3. Нагрузка на окружающую среду. Технология должна обеспечивать минимальную нагрузку на окружающую среду по новым (или сопутствующим) газообразным, жидким и твёрдым отходам.

Реализация экологических требований к чистоте технологий достигается созданием в технологических схемах замкнутых, бессточных и водооборотных циклов; наличием систем очистки абгазов и возможных сточных вод; оснащением технологий современными техническими средствами контроля за технологическим процессом; разработкой и обоснованием (при необходимости) предельно-допустимых концентраций (ПДК) вредных примесей для рабочих и санитарно-защитных зон и предельно допустимых выбросов (ПДВ).

### **Технические требования к технологиям ликвидации ОТПО**

1. Эффективность. Технология должна наилучшим образом обеспечить ликвидацию ОТПО.

2. Надёжность. Технология (технологическая система) должна выполнять заданные функции с сохранением эксплуатационных показателей в течение требуемого промежутка времени и наработки. Надёжность техниче-

ской системы обуславливается совокупностью свойств: безотказностью, долговечностью и ремонтнопригодностью.

3. Производительность. Технология должна обеспечивать ликвидацию ОТПО в минимально возможные сроки.

4. Технологичность. Технология должна учитывать наивыгоднейшие возможности изготовления, монтажа и удобства эксплуатации оборудования.

5. Эстетичность. Конструктивное оформление технологий должно в полной мере отвечать условиям технической эстетики.

Реализация технических требований достигается оптимальным структурным построением технической системы; конструктивным исполнением отдельных элементов, узлов и агрегатов; организацией технического обслуживания и ремонта; резервированием наиболее важных элементов технологической схемы с целью повышения её надёжности; интенсификацией режимов основных агрегатов.

### Экономические требования к технологиям ликвидации ОТПО

1. Потребности в сырье, энергетических средствах. Технология должна обеспечивать минимальные потребности в сырье и энергетических средствах.

2. Капиталовложения. Технология должна обеспечивать минимальные капитальные вложения, в том числе минимальную стоимость работ по проектированию, выполнению строительно-монтажных работ и их эксплуатации.

3. Стоимость. Технология должна обеспечивать оптимальное соотношение количества ликвидированного ОТПО на единицу денежных затрат.

Предлагаемый подход в конце 90-х годов был реализован при конкурсном отборе технологий уничтожения ХО. На рассмотрение были представлены около 30 технологий уничтожения ХО, разработанные отечественными научно-исследовательскими организациями, предприятиями промышленности и другими организациями, которые по степени отработанности были отнесены: к техническим предложениям; к научно-исследовательским разработкам; к опытно-конструкторским работам; к реализованным технологиям.

По результатам конкурсного отбора применительно к уничтожению ХО была отобрана двухстадийная технология, сущность которой заключается в следующем:

– на первой стадии производилось извлечение ОВ из ёмкости или корпуса

боеприпаса и в «мягких» контролируемых условиях химическая детоксикация ОВ с получением реакционной массы;

– на второй стадии реакционные массы битумировались с последующим захоронением битумно-солевых блоков или направлялись на термическое обезвреживание.

Необходимо отметить, что после конкурсного отбора технологий был выполнен ряд научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ, в которых отобранные технологии получили реализацию в виде конкретных опытных образцов специального оборудования и технологических линий.

Результаты выполненных исследований и конструкторских работ легли в основу исходных данных для разработки технико-экономического обоснования строительства объектов по уничтожению ХО и соответствующей проектной документации.

Предлагаемый подход может послужить основой для успешного выполнения огромного комплекса мероприятий по ликвидации ОТПО.

### Литература

1. Федеральный закон от 24 июня 1998 года № 89-ФЗ «Об отходах производства и потребления» [Электронный ресурс] [http://www.consultant.ru/document/cons\\_doc\\_LAW\\_19109/](http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_19109/) (Дата обращения 11.10.2017).
2. Собко А.А. Отчёт по результатам исследования качества сточных вод внутреннего и обводного каналов, обводненных отходов жидкой фракции с открытых карт-котлованов № 64, № 68 объекта «Канализационные очистные сооружения производственных и поверхностных сточных вод СПб ГУПП «Полигон «Красный Бор», АО «РАОПРОЕКТ», СПб., 2016.
3. Ишпахтин В.В., Горький А.В., Ларионова Н.А. Отчёт об оказанных услугах по сбору и анализу результатов ранее выполненных исследований в районе расположения СПб ГУПП «Полигон «Красный Бор» с краткой пояснительной запиской по геоэкологической обстановке для разработки задания на дальнейшие изыскания и сценария реабилитации объекта. Российский геоэкологический центр. СПб., 2016.
4. Петров С.В. Экспертная оценка технологий уничтожения запасов люизита // Российский химический журнал. 1995. Т. 39. № 4. С. 4.
5. Капашин В.П., Щелученко В.В., Батырев В.В. Химическое разоружение. Научные основы технологии уничтожения фосфорорганических отравляющих веществ и утилизации реакционных масс. М.: ФУ БХ и УХО. 2010. 79 с.

References

1. Federal Law of June 24, 1998 No. 89-FZ "On production and consumption wastes" [[Internet resource] [http://www.consultant.ru/document/cons\\_doc\\_LAW\\_19109/](http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_19109/) (Accessed: 11.10.2017) (in Russian).

2. Sobko A.A. Report on the results of studying the quality of wastewater from internal and bypass canals, watered wastes of liquid fraction from open pits No. 64, 68 of the facility "Sewage treatment plants of industrial and surface wastewater of SPb GUPP" Polygon "Krasnyy Bor", AO "RAOPROEKT". Sankt-Peterburg, 2016 (in Russian).

3. Ishpakhtin V.V., Gorky A.V., Larionova N.A. Report on the services provided for collection and analysis of

the results of earlier studies in the area of the SPb GUPP Polygon Krasnyy Bor with a brief explanatory note on the geoeological situation for development of the task for further surveys and scenarios for rehabilitation of the facility. Rossiyskiy Geoekologicheskii Tsent. Sankt-Peterburg, 2016 (in Russian).

4. Petrov S.V. Expert evaluation of technologies for lewisite stocks destruction // Russkiy Khimicheskii Zhurnal. 1995. V. 39. No. 4. P. 4 (in Russian).

5. Kapashin V.P., Sheluchenko V.V., Batyrev V.V. Chemical disarmament. Scientific foundations of technology for destruction of organophosphorus poisonous substances and utilization of reactionary masses. Moskva: FU BKh and UKhO. 2010. 79 p. (in Russian).

УДК 628.4.045:623.459

Способы ликвидации опасных и токсичных промышленных отходов

© 2017. В. П. Капашин<sup>1</sup>, д. т. н., начальник,  
В. Г. Мандыч<sup>1</sup>, к. т. н., заместитель начальника управления,  
В. А. Воронин<sup>2</sup>, к. т. н., начальник,  
А. С. Лякин<sup>2</sup>, к. т. н., начальник управления,  
И. Н. Исаев<sup>2</sup>, к. х. н., начальник управления,  
И. В. Коваленко<sup>2</sup>, к. т. н., с. н. с.,

<sup>1</sup>Федеральное управление по безопасному хранению и уничтожению химического оружия, 115487, Россия, г. Москва, ул. Садовники, 4 а,

<sup>2</sup>Научно-исследовательский центр Федерального управления по безопасному хранению и уничтожению химического оружия, 115487, Россия, г. Москва, ул. Садовники, 4 а, e-mail: fubhuho@mail.ru

В статье приводится обзор основных способов и методов ликвидации опасных и токсичных промышленных отходов. Опасные и токсичные промышленные отходы относятся к безвозвратным отходам, так как повторное их использование недопустимо и/или невозможно и нецелесообразно.

Указанные виды отходов должны подлежать ликвидации, а основными направлениями их ликвидации могут быть обезвреживание (исключение или снижение уровня опасности отходов до допустимого значения), сжигание (уменьшение объема отходов и, если это возможно, извлечения из них ценных материалов, золы или получения энергии), уничтожение (полное прекращение существования отходов) и захоронение (изоляция отходов, не подлежащих дальнейшему использованию, путем размещения в назначенном месте для специального хранения в течение неограниченного срока с исключением (предотвращением) их опасного воздействия на окружающую природную среду и незащищенных людей, на допустимом расстоянии от места захоронения).

Рассматриваются возможности применения методов сжигания, жидкофазного окисления, гетерогенного катализа, пиролиза, огневой переработки, переработки и обезвреживания отходов с применением плазмы.

Огневое (термическое или с применением катализаторов) обезвреживание промышленных отходов приводит к уничтожению органических веществ, которые могли бы явиться ценным сырьем целевых продуктов. В связи с этим одним из перспективных направлений в области утилизации опасных отходов считается переработка и обезвреживание отходов с применением плазмы. Плазменный метод может использоваться для плазмохимической ликвидации особо опасных высокотоксичных отходов или для переработки отходов с целью получения товарной продукции.

Многообразие способов и реализуемых методов для переработки или уничтожения отходов свидетельствует о сложности проблемы ликвидации отходов, а анализ способов и методов переработки или уничтожения отходов показал, что универсального метода не имеется.

Рассмотренные способы ориентированы на переработку или уничтожение определённых видов отходов и в совокупности могут послужить технологической базой для ликвидации любых видов отходов, но при этом необходимо создание технически сложных специализированных предприятий.

**Ключевые слова:** отходы производства, опасные и токсичные отходы, обезвреживание, уничтожение, захоронение, методы и технологии, плазма, пиролиз, термокатализ.

### Ways of eliminating hazardous and toxic industrial wastes

V. P. Kapashin<sup>1</sup>, V. G. Mandich<sup>1</sup>, V. A. Voronin<sup>2</sup>,  
A. S. Lyakin<sup>2</sup>, I. N. Isaev<sup>2</sup>, I. V. Kovalenko<sup>2</sup>,

<sup>1</sup>Federal Directorate for Safe Storage  
and Destruction of Chemical Weapons,  
4 a St. Sadovniki, Moscow, Russia, 115487,

<sup>2</sup>Research and Development center of the Federal Directorate  
for Safe Storage and Destruction of Chemical Weapons,  
4 a St. Sadovniki, Moscow, Russia, 115487,  
e-mail: fubhuho@mail.ru

The article provides an overview of the main methods for eliminating hazardous and toxic industrial wastes. Hazardous and toxic industrial wastes refer to non-returnable wastes, since their repeated use is unacceptable, and often impossible and impractical.

These types of waste should be subject to liquidation, and the main directions for their elimination can be neutralization (elimination or reduction of the level of waste hazard to an acceptable value), burning (reducing the volume of waste, and, if possible, extracting valuable materials, ash or energy); destruction (complete cessation of the existence of waste) and disposal (isolation of waste that is no longer to be used by placing it in a designated place for special storage for an unlimited period and with exclusion (prevention) of their hazardous effects on the environment and unprotected people, at an acceptable distance from the burial site).

The possibilities of application of combustion methods, liquid-phase oxidation, heterogeneous catalysis, pyrolysis, fire processing, processing and neutralization of wastes with the use of plasma are considered.

Fire (thermal or with the use of catalysts) neutralization of industrial waste leads to destruction of organic substances, which could be a valuable raw material of the target products. In this regard, one of the promising areas in the field of hazardous waste management is processing and disposal of waste with the use of plasma. The plasma method can be used for plasma-chemical elimination of especially dangerous high-toxic waste or for processing waste in order to obtain marketable products.

The variety of methods for processing or destroying waste indicates complexity of the problem of waste disposal, and the analysis of methods for processing or destroying waste has shown that there is no universal method.

The methods considered are oriented towards processing or destruction of certain types of waste and in aggregate can serve as a technological base for liquidation of any types of waste, but at the same time it is necessary to create technically complex specialized enterprises.

**Keywords:** production waste, hazardous and toxic waste, neutralization, destruction, burial, methods and technologies, plasma, pyrolysis, thermal catalysis.

Порядок обращения с отходами производства и потребления регламентируется требованиями федерального законодательства [1].

К отходам производства относятся остатки сырья, материалов, веществ, изделий, предметов, образовавшихся в процессе производства продукции, выполнения работ (услуг) и утраченные полностью или частично исходные потребительские свойства [2].

Среди отходов производства различают:

– опасные отходы – отходы, существование которых и (или) обращение с которыми представляют опасность для жизни, здоровья человека и окружающей природной среды [2];

– токсичные отходы – отходы, содержащие вещества, которые в случае попадания в окружающую среду представляют или могут представить угрозу для человека в результате биоаккумуляции и (или) токсичного воздействия на биотические системы [2].

Как правило, опасные и токсичные промышленные отходы (ОТПО) невозможно, нецелесообразно (неэффективно) или недопустимо использовать повторно, поэтому они относятся к безвозвратным отходам и подлежат ликвидации.

Основными направлениями ликвидации ОТПО могут быть [2]:

- обезвреживание отходов – процесс обработки, имеющий целью исключение их опасности или снижение её уровня до допустимого значения;
- сжигание отходов – термический процесс окисления с целью уменьшения объёма отходов и, если это возможно, извлечения из них ценных материалов, золы или получения энергии;
- уничтожение отходов – процесс обработки, имеющий целью практически полное прекращение их существования;
- захоронение опасных отходов – процесс изоляции опасных отходов, не подлежащих дальнейшему использованию, путём размещения в назначенном месте для специального хранения в течение неограниченного срока с исключением (предотвращением) опасного воздействия захороненных отходов на окружающую природную среду и незащищённых людей, находящихся на допустимом нормативами расстоянии от места захоронения.

Местом безопасного размещения ОТПО должны являться специализированные полигоны. Но если захоронение ОТПО угрожает здоровью и жизни людей и может нанести непоправимый вред окружающей среде, то на полигоне должны предусматриваться мероприятия по уничтожению отходов [3].

Полигоны в соответствии с санитарно-эпидемиологическими нормами и правилами (СНиП) [4] являются природоохранными сооружениями и предназначены для централизованного сбора, обезвреживания и захоронения токсичных отходов промышленных предприятий, научно-исследовательских организаций и учреждений.

Промышленные токсичные отходы, поступающие на полигон, по своим физико-химическим свойствам и методам переработки подразделяются на группы, в зависимости от которых применяется тот или иной метод обезвреживания и захоронения.

Приёму на полигон подлежат только токсичные промышленные отходы I, II, III и при необходимости IV классов опасности, перечни которых в каждом конкретном случае согласовываются с органами и учреждениями санитарно-эпидемиологической и коммунальной служб, заказчиком и разработчиком проекта полигона.

Наиболее важными объектами полигона являются производственные мощности (предприятие) по обезвреживанию токсичных промышленных отходов и участок захоронения токсичных промышленных отходов.

Предприятие по обезвреживанию токсичных промышленных отходов предназначено для сжигания и физико-химической переработки отходов с целью их обезвреживания или понижения токсичности (класса опасности), перевода их в нерастворимые формы, обезвреживания и сокращения объёма отходов, подлежащих захоронению.

Участок захоронения токсичных промышленных отходов представляет собой обособленную территорию, предназначенную для размещения специально оборудованных карт (котлованов), в которые складываются токсичные твёрдые отходы различных классов опасности, а также вспомогательных зданий и сооружений [4].

Практически для всех видов токсичных промышленных отходов на предприятии по обезвреживанию отходов (в составе полигона) предусматривается термический метод их обезвреживания с устройством соответствующих систем очистки выбросов и дымовых газов.

Способ сжигания токсичных промышленных отходов ранее считался перспективным [5–7], однако исключение загрязнения окружающей среды высокотоксичными веществами возможно только на специальных предприятиях, не окупающих в результате своей деятельности затраты на строительство и эксплуатацию.

Среди других термических методов, которые рассматривались в качестве способов ликвидации промышленных отходов, можно отметить: жидкофазное окисление, гетерогенный катализ, пиролиз промышленных отходов, огневая переработка, переработка и обезвреживание отходов с применением плазмы [7].

Метод жидкофазного окисления не является самостоятельным способом обезвреживания токсичных отходов и целесообразен к применению при первичной переработке отходов.

Гетерогенный катализ имеет три разновидности (термокаталитическое окисление, термокаталитическое восстановление и парофазное каталитическое окисление) и как метод применим для обезвреживания газообразных и жидких отходов (в основном сточных вод), но нецелесообразен в качестве самостоятельного способа обезвреживания токсичных отходов, а только в качестве отдельной ступени в общем технологическом цикле [7].

Пиролиз промышленных отходов существует в двух различных типах: окислительный и сухой пиролиз.

В свою очередь сухой пиролиз в зависимости от температуры, при которой протекает процесс, различается [7]:

- низкотемпературный с температурой процесса 450–550 °С;
- среднетемпературный с температурой процесса около 800 °С;
- высокотемпературный с температурой процесса 900–1050 °С.

Метод окислительного пиролиза является перспективным направлением ликвидации твёрдых промышленных отходов и сточных вод.

Метод сухого пиролиза получает всё большее распространение и является одним из самых перспективных способов утилизации твёрдых органических отходов и выделения ценных компонентов из них. Основное преимущество этого метода заключается в том, что в процессе термического разложения без доступа кислорода образуются пиролизный газ с высокой теплотой сгорания, жидкие продукты и твёрдый углеродистый остаток.

В зависимости от типа отходов и способов обезвреживания различают следующие разновидности огневого метода переработки токсичных промышленных отходов [7]:

- сжигание отходов, способных гореть самостоятельно, – наиболее простой способ, при этом горение происходит при температурах не ниже 1200–1300 °С;
- огневой окислительный метод обезвреживания негорючих отходов – сложный физико-химический процесс, состоящий из различных физических и химических стадий. Огневое окисление применимо в большей степени по отношению к твёрдым и пастообразным отходам;
- огневой восстановительный метод используется для уничтожения токсичных отходов без получения каких-либо побочных продуктов, пригодных для дальнейшего использования в качестве сырья или товарных продуктов. Этот метод целесообразен для обезвреживания газообразных, твёрдых выбросов и бытовых отходов;
- огневая регенерация предназначена для извлечения из отходов какого-либо производства реагентов, используемых в этом производстве, или восстановления свойств отработанных реагентов или материалов. Эта разновидность огневого обезвреживания обеспечивает не только природоохранные, но и ресурсосберегающие цели.

Считается, что огневое обезвреживание (чисто термическое или с применением ката-

лизаторов) промышленных отходов приводит к уничтожению органических веществ, которые могли бы явиться ценным сырьём целевых продуктов [7].

В последние десятилетия одним из перспективных направлений в области утилизации опасных отходов считается переработка и обезвреживание отходов с применением плазмы [8].

Посредством плазмы достигается высокая степень обезвреживания отходов химической промышленности, в том числе галогенсодержащих органических соединений, медицинских учреждений; ведётся переработка твёрдых, пастообразных, жидких, газообразных; органических и неорганических; слаборадиоактивных; бытовых; канцерогенных веществ, на которые установлены жёсткие нормы ПДК в воздухе, воде, почве и др.

Плазменный метод может использоваться [9, 10] как для плазмохимической ликвидации особо опасных высокотоксичных отходов, так и для плазмохимической переработки отходов с целью получения товарной продукции.

Высокая энергоёмкость и сложность процесса предопределяет его применение для переработки только отходов, огневое обезвреживание которых не удовлетворяет экологическим требованиям.

Многообразие способов и реализуемых методов для переработки или уничтожения отходов свидетельствует о том, что на сегодня разработаны разные методы утилизации и обезвреживания промышленных отходов, однако многие из них сложны, трудоёмки, представляют значительные сложности в ликвидации всех видов отходов, не всегда отвечают экологическим требованиям. Анализ способов и методов переработки или уничтожения отходов показал, что универсального метода нет, за исключением метода сжигания отходов, который считается наименее экологичным.

Все рассмотренные способы ориентированы на переработку или уничтожение определённых видов отходов и в совокупности могут послужить технологической базой для ликвидации любых видов отходов. Но при этом речь может идти о создании технически сложных специализированных предприятий, затраты на строительство и эксплуатацию которых тоже будут значительными.

В контексте решения проблемы ликвидации огромного количества ОТПО, которые сосредоточены в Ленинградской области на полигоне «Красный Бор» и в Нижегородской области на неорганизованной свалке промыш-

ленных отходов «Чёрная дыра», возникает необходимость по выбору научно обоснованного способа ликвидации сложных по составу ОТПО. В основе способа ликвидации ОТПО должна быть положена наиболее целесообразная, безопасная и экономичная технология.

Совершенно очевидно, что проблема ликвидации ОТПО на указанных выше объектах – это решение частной, но технологически сложной задачи с выбором конкретной технологии, которую целесообразно осуществить на конкурсной основе [11, 12].

## Литература

1. Федеральный закон от 24 июня 1998 года № 89-ФЗ «Об отходах производства и потребления» [Электронный ресурс] [http://www.consultant.ru/document/cons\\_doc\\_LAW\\_19109/](http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_19109/) (Дата обращения 12.10.2017).
2. ГОСТ 30772-2001. Ресурсосбережение. Обращение с отходами. Термины и определения. М.: ИПК Издательство стандартов, 2002. 32 с.
3. ГОСТ Р 53692-2009. Ресурсосбережение. Обращение с отходами. Этапы технологического цикла отходов. М.: Стандартинформ, 2011 15 с.
4. СНиП 2.01.28-85. Полигоны по обезвреживанию и захоронению токсичных промышленных отходов. Основные положения по проектированию. М.: ЦИТП Госстроя СССР, 1985. 16 с.
5. Беспамятнов Г.П., Ботушевская К.К., Зеленская Л.А. Термические методы обезвреживания отходов. Л.: Химия, 1975. 426 с.
6. Наркевич И.П., Печковский В.В. Утилизация и ликвидация отходов технологии органических веществ. М.: Химия, 1984. 240 с.
7. Бернадинер М.Н., Шурыгин А.П. Огневая переработка и обезвреживание промышленных отходов. М.: Химия, 1990. 304 с.
8. Крапивина С.А. Плазмохимические технологические процессы. Л.: Химия, 1995. 247 с.
9. Литвинов В.К., Дмитриев С.А., Киярв Ч.А. Плазменная шахтная печь для переработки радиоактивных отходов средней и низкой активности. Магнитогорск: Магнитогорский горно-металлургический институт, НПО «Радон», 1993. 62 с.
10. Лукашов В.П., Янковский А.И. Переработка и обезвреживание промышленных и бытовых отходов с применением низкотемпературной плазмы // Муниципальные и промышленные отходы: способы обезвреживания и вторичной переработки – аналитические обзоры. Новосибирск, 1995. Серия Экология. С. 234.

11. Петров С.В. Экспертная оценка технологий уничтожения запасов люизита // Российский химический журнал. 1995. Т. 39. № 4. С. 4.

12. Капашин В.П., Щелученко В.В., Батырев В.В. Химическое разоружение. Научные основы технологии уничтожения фосфорорганических отравляющих веществ и утилизации реакционных масс. М.: ФУ БХи УХО, 2010. 79 с.

## References

1. Federal Law of June 24, 1998 No. 89-FZ “On production and consumption wastes” [Electronic resource] [http://www.consultant.ru/document/cons\\_doc\\_LAW\\_19109/](http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_19109/) (Accessed: 12.10.2017) (in Russian).
2. GOST 30772-2001. Resource-saving. Waste management. Terms and Definitions. Moskva: IPK Izdatelstvo standartov, 2002. 32 p. (in Russian).
3. GOST R 53692-2009. Resource-saving. Waste management. Stages of the technological cycle of waste. Moskva: Standartinform, 2011 15 p. (in Russian).
4. SNiP 2.01.28-85. Polygons for neutralization and burial of toxic industrial wastes. The main provisions for the design. Moskva: TsITP Gosstroya SSSR, 1985. 16 p. (in Russian).
5. Беспамятнов Г.П., Ботушевская К.К., Зеленская Л.А. Thermal methods of waste neutralization. Leningrad: Khimiya, 1975. 426 p. (in Russian).
6. Narkevich I.P., Pechkovsky V.V. Utilization and disposal of waste products of organic matter technology. Moskva: Khimiya, 1984. 240 p. (in Russian).
7. Bernadiner M.N., Shurygin A.P. Fire processing and neutralization of industrial wastes. Moskva: Khimiya, 1990. 304 p. (in Russian).
8. Krapivina S.A. Plasma-chemical technological processes. Leningrad: Khimiya, 1995. 247 p. (in Russian).
9. Litvinov V.K., Dmitriev S.A., Kiyarv Ch.A. Plasma shaft furnace for processing radioactive wastes of medium and low activity. Magnitogorsk: Magnitogorskiy gorno-metallurgicheskiy institut, NPO “Radon”, 1993. 62 p. (in Russian).
10. Lukashov V.P., Yankovsky A.I. Processing and neutralization of industrial and domestic waste using low-temperature plasma // Municipal and industrial waste: methods of neutralization and recycling – analytical reviews. Novosibirsk, 1995. Seriya Ekologiya. P. 234 (in Russian).
11. Petrov S.V. Expert evaluation of technologies for low-isotope stocks destruction // Rossiyskiy khimicheskiy zhurnal. 1995. V. 39. No. 4. P. 4 (in Russian).
12. Kapashin V.P., Sheluchenko V.V., Batyrev V.V. Chemical disarmament. Scientific foundations of technology for destruction of organophosphorus poisonous substances and utilization of reactionary masses. Moskva: FU BKh i UKhO, 2010. 79 p. (in Russian).

## Микробная биотехнология рекультивации почвы для санирования и устойчивого функционирования техногенной экосистемы

© 2017. А. А. Лещенко<sup>1</sup>, д. т. н., профессор,  
 И. П. Погорельский<sup>1</sup>, д. м. н., профессор,  
 Т. Я. Ашихмина<sup>1,3</sup>, д. т. н., профессор, зав. кафедрой, зав. лабораторией,  
 И. А. Лундовских<sup>1</sup>, к. х. н., доцент, И. В. Дармов<sup>1</sup>, д. м. н., профессор, зав. кафедрой,  
 С. Н. Янов<sup>1</sup>, д. б. н., профессор, А. Г. Лазыкин<sup>1</sup>, к. б. н., доцент,  
 М. Р. Шабалина<sup>1</sup>, к. п. н., доцент, И. А. Устюжанин<sup>2</sup>, к. с-х. н., зам. директора,  
 С. А. Шаров<sup>1</sup>, аспирант, Г. М. Рычков<sup>1</sup>, бакалавр,  
<sup>1</sup>Вятский государственный университет,  
 610000, Россия, г. Киров, ул. Московская, 36,  
<sup>2</sup>Зональный научно-исследовательский институт сельского хозяйства  
 Северо-Востока им. Н. В. Рудницкого РАСХН,  
 610007, Россия, г. Киров, ул. Ленина, 166-а,  
<sup>3</sup> Институт биологии Коми НЦ УрО РАН,  
 167982, Россия, Сыктывкар, ул. Коммунистическая, 28,  
 e-mail: ipogorelsky@inbox.ru

В соответствии с Федеральным законом «Об уничтожении химического оружия» объекты по уничтожению запасов химического оружия (УХО) являются федеральной собственностью и подлежат перепрофилированию в интересах обороны и безопасности страны. В связи с этим как на этапе вывода объекта из эксплуатации, так и при выполнении работ по ликвидации последствий его деятельности, необходимо проведение комплекса реабилитационных мероприятий и, следовательно, проблема рекультивации и санации почвы в месте функционирования объекта УХО «Марадыковский» после принятия решения по его перепрофилированию со всей очевидностью становится актуальной и может включать этап с использованием биопрепаратов. Результаты многолетнего биомониторинга свидетельствуют о том, что объект не оказал негативного воздействия на природные экосистемы. В статье рассматриваются существующие научно-практические подходы для проведения комплекса реабилитационных мероприятий, в частности, нового ферментативного и микробиологического подходов, являющихся базой экологической биотехнологии рекультивации и санирования техногенной экосистемы объекта. Проанализированы результаты комбинированного использования гексагистидин-содержащей органофосфатгидролазы, гидролизующей фосфорорганические соединения (ФОС), и биокатализатора в виде иммобилизованных клеток бактерий рода *Pseudomonas*, осуществляющего метаболическое разложение метилфосфоновой кислоты в процессах биодеструкции фосфорорганических отравляющих веществ (ФОВ) и продуктов их гидролиза в составе реакционных масс, образующихся в результате химического уничтожения ФОВ.

Представлены данные об использовании растительно-микробной ассоциации клубеньковых бактерий *Rhizobium loti*, бактерий штамма-деструктора нефти и нефтепродуктов *Pseudomonas delhiensis* VG-11 с бобовым растением лядвенцом рогатым (*Lotus corniculatus*) и сочетания данной ассоциации с биодеградативным потенциалом псевдомонад – деструкторов ФОС – *Pseudomonas fluorescens* VG-5 и *Pseudomonas putida* VG-8 в составе единого двухкомпонентного биопрепарата. Апробация двухкомпонентного биопрепарата в микрополевых экспериментах свидетельствует о возможности практического использования его потенциала в биотехнологии рекультивации почвы на объекте УХО «Марадыковский».

**Ключевые слова:** рекультивация, экотоксикант, органофосфатгидролаза, биокатализаторы, микроорганизмы, растительно-микробная ассоциация, биодеструкция.

## Microbial biotechnology of soil remediation for sanitation and sustainable functioning of the technogenic ecosystem

A. A. Leshchenko<sup>1</sup>, I. P. Pogorelsky<sup>1</sup>,  
 T. Ya. Ashikhmina<sup>1,3</sup>, I. A. Lundovskikh<sup>1</sup>,  
 I. V. Darmov<sup>1</sup>, S. N. Yanov<sup>1</sup>, A. G. Lazykin<sup>1</sup>, M. R. Shabalina<sup>1</sup>,  
 I. A. Ustyuzhanin<sup>2</sup>, S. A. Sharov<sup>1</sup>, G. M. Rychkov<sup>1</sup>,

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

36 Moskovskaya St., Kirov, Russia, 610000,

<sup>2</sup>N.V. Rudnitsky Zonal North-East Agricultural Research Institute,

166a, Lenina St., Kirov, Russia, 610007,

<sup>3</sup>Institute of Biology of the Komi Science Centre of the Ural Division RAS,

28 Kommunisticheskaya St., Syktyvkar, Russia, 167982,

e-mail: ipogorelsky@inbox.ru

In accordance with the federal law On Chemical Weapons Destruction, chemical weapons destruction plants (CWD) are a federal property and are subject to redevelopment in the interests of national defense and security. In this regard, both at the stage of decommissioning and during liquidation of activities, it is necessary to carry out a complex of rehabilitation measures. Consequently, the problem of reclamation and sanitation of soil at the site of operation of the "Maradykovsky CWD plant after the decision of its reorientation evidently will be relevant and may include a biological stage of using biopreparations. The results of biomonitoring indicate that the plant did not have a negative impact on natural ecosystems. The article considers the existing scientific and practical approaches for carrying out a complex of rehabilitation measures: new enzymatic and microbiological approaches, which are the basis of ecological biotechnology of reclamation and sanitation of the technogenic ecosystem of the plant. The results are analyzed of the combined use of hexahistidine-containing organophosphate hydrolase hydrolyzing organophosphorus compounds (OPC) and the biocatalyst in the form of immobilized cells of bacteria of the genus *Pseudomonas*, which performs metabolic decomposition of methylphosphonic acid in the process of biodegradation of organophosphorus toxic agents and their hydrolysis products in the reactionary masses formed as a result of chemical destruction of OPC. The data are presented on the use of the plant-microbial association of nodule bacteria *Rhizobium loti*, the oil and petroleum products destructor strain *Pseudomonas delhiensis* VG-11 with leg corn plant (*Lotus corniculatus*), and the combination of this association with a biodegradative potential of *Pseudomonas fluorescens* VG-5 and *Pseudomonas putida* VG-8 – destructors of POC as a part of a single two-component biopreparation. Approval of the two-component biopreparation in microfield experiments indicates the possibility of practical use of its potential in biotechnology of soil remediation at the "Maradykovsky" CWD plant.

**Keywords:** recultivation, ecotoxicants, organophosphate hydrolase, biocatalysts, microorganisms, plant-microbial association, biodegradation.

В 2015 г. на объекте уничтожения химического оружия (УХО) «Марадыковский» был ликвидирован последний боеприпас с отравляющим веществом из хранящихся в арсенале. Внедрение и сертификация системы экологического менеджмента на природной и техногенной территории объекта УХО, создание и функционирование многоуровневых систем производственного контроля, а также государственного экологического контроля и мониторинга, в значительной степени обеспечили необходимую эффективность природоохранной деятельности [1]. Результаты исследования экологического состояния территории объекта УХО «Марадыковский» и участков мониторинга с использованием широкого спектра современных методов обследования и репрезентативных показателей свидетельствуют об отсутствии опасных превышений ПДК загрязняющих веществ в природных средах и объектах окружающей среды [2]. Влияние объекта УХО проявилось лишь в накоплении соединений фосфора в эпифитных лишайниках на участках мониторинга, ближайших к объекту УХО [3]. В то же время, по мнению специалистов, нельзя исключить возможность отсроченного действия загрязняющих веществ на окружающую среду [4]. Такая

возможность подлежит обязательному рассмотрению, исходя из аккумулялирующей функции почвенной микробиоты. После воздействия на почву химических соединений, образующихся в ходе выполнения специального комплекса инженерно-технических мероприятий по обезвреживанию и приведению в безопасное состояние инфраструктуры объекта и технического оборудования, контактировавшего с отравляющими веществами, а также дегазирующими рецептурами, территория объекта УХО окажется малоприспособленной для жизни, по крайней мере для многих почвенных обитателей. Данное обстоятельство служит императивом для экологизации реабилитационных мероприятий, обеспечивающих более действенную санацию территории объекта УХО.

Как известно, в экологии одним из самых сложных вопросов является соотношение между видовым биоразнообразием и устойчивостью биотических сообществ и экосистем. Функционирование объекта УХО «Марадыковский» в определенной степени привело к снижению или исчезновению из экосистемы одного или нескольких видов, образующих консорцию, за которыми, естественно, последовало «исчезновение консорбентов, не входящих в другие консорции той же или другой

территориально и функционально близкой экосистемы» [5]. Поэтому очень важно произвести отбор проб почвы с загрязнённой территории и установить жизнеспособность природных микроорганизмов. При этом микробиологический анализ почвы должен быть частью комплексного обследования для последующего формирования полноценной характеристики территории объекта УХО. Как следует из опубликованных в работе материалов [4], тщательное обследование территории объекта УХО, мест бывшего производства, хранения, уничтожения отравляющих веществ является существенным для установления типа токсического соединения, обнаруженного на загрязнённой территории, его концентрации, глубины проникновения экотоксиканта в почву; типа почвы, её влажности, кислотности и процентного содержания гумуса; предполагаемого количества осадков, выпадающих на данной территории; наличия и глубины залегания грунтовых вод; определения загрязнённости вод.

Итоги проведения такого комплексного обследования следует рассматривать в качестве естественного дополнения к результатам анализов фондовых материалов, а также к результатам полевого обследования, в ходе которых было установлено, что за период строительства и эксплуатации объекта УХО территория вблизи полигона подвергалась изменению вследствие изъятия грунта, вырубки леса, планировки местности, движения транспорта, строительства дамб и дорог. Проводилась также расчистка леса вокруг объекта УХО с вырубкой подлеска, наблюдалось постепенное зарастание ранее существующих просек, сохранились следы ветровалов [2]. Безусловно, что при проведении таких масштабных строительных, мелиоративных и других видов работ, коренным образом изменивших природный ландшафт места дислокации объекта УХО, нельзя было обойтись без нефтепродуктов и, как следствие, их проливов на почву. Нефть и нефтепродукты лишь добавляют остроту проблеме по рекультивации почвы и ставят её решение в зависимость от общей стратегии санации территории объекта УХО.

Известно, что в соответствии с Федеральным законом «Об уничтожении химического оружия» объекты УХО являются исключительно федеральной собственностью и управляются в установленном порядке. После приведения в надлежащее состояние их предлагается использовать в первую очередь для нужд обороны и безопасности страны, а

в случае отсутствия такой потребности они будут вовлечены в хозяйственный оборот в интересах региона их расположения [1]. В настоящее время на этапе вывода объекта УХО «Марадыковский» из эксплуатации главной задачей является проведение работ по обезвреживанию и санации высвободившихся корпусов и передачи их для репрофилирования инвесторам. Реализация этих мероприятий должна осуществляться в рамках подпрограммы «Ликвидация последствий деятельности объектов по хранению и объектов по уничтожению химического оружия в Российской Федерации на 2019–2024 гг.». Есть все основания надеяться на то, что при проведении санации территории объекта УХО будут обязательно учтены данные экологического мониторинга территории объекта и без внимания не останутся имеющиеся результаты проведения комплексного её обследования. И, конечно же, должна быть разработана и утверждена технология очистки загрязнённых территорий объекта с учётом того, что загрязнения могут быть причиной таких последствий, как торможение почвообразовательных процессов и самоочищения почвы, значительного изменения видового состава и жизнеспособности почвенной микробиоты, накопления вредных веществ в окружающей среде, которые прямо или опосредованно могут оказывать влияние на здоровье человека. Вся эта информация, особенно характеризующая жизнеспособность природных микроорганизмов, крайне необходима для успешного осуществления биологического этапа рекультивации почвы. Почвенная микробиота должна рассматриваться как необходимый естественный элемент и активный участник биотехнологии рекультивации почвы на объекте УХО. Но именно жизнеспособность природных микроорганизмов ставится под сомнение в случае использования разработанной применительно к условиям объекта УХО «Марадыковский» технологии «рекультивации загрязнённой территории» [6]. Суть её заключается в дегазации грунта перекисно-щелочной рецептурой с одновременным рыхлением с помощью щелереза-рыхлителя-кратователя или машины для глубокого фрезерования земель МТП-44Б. При этом норма расхода перекисно-щелочной рецептуры должна составить до 100 л на 1 м<sup>2</sup>. Данная рецептура, по заявлению разработчиков [6], эффективна как для обеззараживания (дегазации) отравляющих веществ, так и продуктов их детоксикации, и применима независимо от

характера загрязнений. Прогнозируется, что технология позволит произвести гарантированную очистку загрязнённой территории. С точки зрения специалиста по ликвидации последствий деятельности объекта УХО, данная технология вполне вписывается в общий план мероприятий по перепрофилированию объектов УХО. Но с точки зрения эколога, а тем более микробиолога, применение такого способа очистки загрязнённой территории – это явное нарушение принципа экологической адекватности, поскольку вследствие воздействия значительных количеств перекисно-щелочной рецептуры произойдёт «микрoэкологическая катастрофа» локального масштаба: будет на длительное время уничтожена почвенная микробиота вместе с почвенным покровом [7]. А уничтожение почвенного покрова, являющегося важнейшим сорбционно-химическим барьером на пути миграции экотоксикантов из атмосферы в грунтовые воды и реки – это крайняя степень деградации почвы. Кроме того, при таком подходе к рекультивации будет полностью проигнорирована эколого-микробиологическая концепция охраны почв от химического загрязнения [7].

Таким образом, эколого-микробиологическая концепция охраны почв от химического загрязнения однозначно фиксирует существенную роль микроорганизмов (почвенных, в том числе фотосинтезирующих микробов, водорослей и цианобактерий) в процессах биологической реабилитации почвы. К сожалению, в настоящее время почва как среда обитания микробиоты претерпевает значительные, а порой невосполнимые, негативные изменения. Уже сейчас ясно, что природная среда сохранилась там, где она была недоступна людям для «успешного» преобразования: это суровые, малопродуктивные для жизни земли с экстремальными для человека условиями существования. Тенденция этих изменений такова, что темпы разрушения почвенного покрова значительно выше, чем скорость образования, а в некоторых странах Европы они приобрели угрожающие масштабы [8]. К этому следует добавить, что для формирования 1 см почвенного слоя требуется в зависимости от условий от 10 до 50 лет. В то же время под монокультурой, например, кукурузы, дефляция почвы идёт со скоростью 1,3 см в год, т. е. во много раз быстрее почвообразования. Естественно, что вслед за прямым уничтожением видов, в том числе представителей микромира, неизбежно может наступить самодеструкция живого. В

этой связи на начальном этапе рекультивации почвы необходимо определиться с выбором щадящего способа обеззараживания и рекультивации почвы территории объекта, эффективность которого соответствовала бы основному принципу медицины, который сформулировал Гиппократ, – «Noli nocere!» («Прежде всего – не навреди!»).

Проблема рекультивации и санации почвы в месте функционирования объекта УХО «Марадыковский» после принятия решения по его перепрофилированию со всей очевидностью стала актуальной. Рекультивация почвы – это комплекс инженерных и санитарно-гигиенических мероприятий, предусматривающих улучшение (восстановление) свойств грунтов в целях исключения физического и химического негативного воздействия на окружающую природную среду [9]. В процессе восстановления исходного состояния земельных участков, загрязнённых экотоксикантами, необходимо осуществлять следующие мероприятия по охране окружающей среды: произвести деградацию экотоксикантов, ликвидировать при необходимости засоленность и солонцеватость почв, а также осуществить ряд других мероприятий. Сам же процесс рекультивации земель и грунтов предполагает удаление экотоксикантов из состава почвы и собственно рекультивацию, включающую технический и биологический этапы. Технический этап рекультивации – это проведение работ, создающих необходимые условия для дальнейшего использования рекультивированных земель по целевому назначению или для проведения мероприятий по восстановлению почвы. Таким образом, меры технической рекультивации направлены на ускорение процессов физического очищения почвы.

Биологический этап включает комплекс агротехнических и фитомелиоративных мероприятий, направленных на улучшение агрофизических, агрохимических, биохимических и других свойств почвы [9, 10]. Таким образом, биорекультивации – это оптимизация физико-химических и биологических факторов очищения почвы. Сам же этап биорекультивации должен выполняться после завершения технического этапа. Суть этапа биорекультивации заключается в подготовке почвы, внесении удобрений и биопрепаратов, подборе трав и травосмесей, посевах и уходе за посевами, что обеспечивает закрепление поверхностного слоя почвы корневой системой растений, создание сомкнутого травостоя и предотвращает

развитие водной и ветровой эрозии почвы на нарушенных землях. Таким образом, биопрепараты, содержащие микроорганизмы-деструкторы, являются составной частью биологической рекультивации, которая призвана ускорить процесс разрушения экотоксикантов в почве [11, 12], и биологический этап её реализации совершенно естественен. Разработка биотехнологии экологически безопасной санации почвы *in situ* в сравнении с физическими, химическими и физико-химическими способами рекультивации почвы является относительно новым направлением научных исследований. Его становление стало возможным благодаря накоплению знаний в таких областях науки, как общая биология, микробиология, в том числе сельскохозяйственная, энзимология, биотехнология, экология, аналитическая химия и ряд других, для которых микроорганизмы являются объектом теоретических и прикладных исследований. Итогом многолетних комплексных междисциплинарных исследований стало признание биотехнологических способов и методов очистки и восстановления почвы, предусматривающих применение бактерий и/или продуцируемых ими ферментов. При этом следует отметить, что микроорганизмы-деструкторы достаточно широко распространены в почве, где создаются все необходимые условия для их адаптации ко многим экотоксикантам, а также для роста и размножения. Однако при кажущейся многочисленности и многообразии встречающихся в природе видов микроорганизмов крайне трудно выделить из окружающей среды штамм бактерий, пригодный по эксплуатационным характеристикам для целей рекультивации почвы той территории, где осуществлялась деятельность объекта УХО «Марадыковский». Известно, что не существует бактерий одного вида, которые бы в одиночку осуществляли биodeградацию экотоксикантов. Поэтому крайне важно иметь в коллекции несколько видов таких микроорганизмов-синергистов, которые были бы биосовместимыми и в то же время высокоэффективными деструкторами ФОВ. По понятным причинам микроорганизмы в естественных условиях их обитания не встречаются с такого рода экотоксикантами и не могут быть адаптированы к ним, что создаёт определённые трудности для выделения природных мутантных штаммов бактерий-деструкторов ФОВ. На помощь пришли методы генетики и селекции, генной инженерии, благодаря которым создана необходимая микробиологическая и ферментативная база

экологической биотехнологии деструкции продуктов детоксикации отравляющих веществ [12].

По принятым в России технологиям уничтожения ФОВ, в получаемых реакционных массах остаётся часть неразложившихся фосфорорганических соединений, сохраняющих нейротоксичную активность [13]. В зависимости от конкретной ситуации, складывающейся на начало проведения комплекса реабилитационных мероприятий и санации почвы в районе функционирования объекта УХО «Марадыковский» после принятия решения по его перепрофилированию, реализация биотехнологических подходов может быть осуществлена в процессе выполнения следующих основных мероприятий:

- обработки почвы *in situ* путём стимулирования природных микроорганизмов-деструкторов, аэрации и введения в почву питательных веществ;
- внесении в почву биокатализаторов на основе ферментов, суспензий или лиофилизированных бактерий-деструкторов, а также иммобилизованных ферментов и бактерий-деструкторов или консорциумов микроорганизмов;
- обработки почвы иммобилизованными ферментными препаратами бактерий-деструкторов, устойчивыми к большим концентрациям экотоксикантов;
- внесении (интродукции) в почву биопрепаратов, сконструированных на основе специализированных микроорганизмов или микроорганизмов в составе растительно-микробных ассоциаций.

В условиях незначительного загрязнения почвы, по-видимому, достаточно будет использовать обычные агротехнические приёмы с внесением необходимых минеральных удобрений, способствующих быстрому самоочищению почвы [12–14]. В случае более интенсивного загрязнения почвы экотоксикантом и глубокого проникновения его в почву надеяться исключительно на самоочищение почвы будет неправильно. Единственным выходом из этой ситуации является «доочистка» реакционных масс, образующихся в процессе уничтожения отравляющих веществ, а образовавшиеся продукты детоксикации должны соответствовать нормативам токсикологической и экологической безопасности, т. е. разложение фосфонатов должно быть максимальным [14]. Данное требование является научно обоснованным, поскольку имеются опубликованные данные о том, что токсичные эфиры метилфосфоновой

кислоты устойчивы к деградации почвенной микробиотой и их удаётся обнаружить даже спустя десятилетия на глубине свыше 1 м [15]. Таким образом, биodeградация таких глубоко проникших в почву экотоксикантов может быть осуществлена с использованием специализированных микроорганизмов на этапе её биологической рекультивации.

Можно условно выделить два направления экологической биотехнологии санации почвы. Одно направление связано с использованием бактериальных ферментов, иммобилизованных клеток бактерий-деструкторов или их консорциумов, а второе направление – с применением для рекультивации почвы биопрепаратов на основе микроорганизмов-деструкторов или на основе растительно-микробных ассоциаций. В обоих случаях реализуются на практике потенциальные возможности микроорганизмов-деструкторов разлагать содержащиеся в получаемых реакционных массах остаточные количества фосфорорганических соединений, сохраняющих нейротоксичную активность [12, 14]. Известно, в частности, несколько ферментов микроорганизмов, ответственных за деструкцию С-Р связи: фосфонатаза, фосфоноацетатгидролаза, фосфонопируватгидролаза, а также полиферментный комплекс С-Р-лиаза. Только последний полиферментный комплекс обладает способностью расщеплять алкилфосфонаты с неактивированной С-Р связью, тогда как первые три фермента активны в отношении небольшого числа фосфонатов с активированной С-Р связью. Особо следует отметить такую характерную особенность С-Р-лиазы, как проявление её специфической активности исключительно в клетках грамтрицательных бактерий [14]. Важно также и то, что С-Р-лиаза в клетках кишечной палочки кодируется четырнадцатью генами *phn* оперона; сам оперон конститутивный, зарепрессированный и в присутствии органического фосфора неактивный, а сам полиферментный комплекс С-Р-лиаза собирается на наружной мембране и с нею связан [16]. Именно поэтому активность С-Р-лиазы никогда не была обнаружена в бесклеточных лизатах, что в определённой степени препятствовало внедрению в практику ферментативной деградации фосфорорганических соединений [17–23]. Выход был найден лишь через 10 лет интенсивных научных исследований, направленных на поиск источников выделения ферментов, активных по отношению к фосфонатам и продуктам их разрушения [19–23]. Планомерные

целенаправленные исследования в данном направлении на первом этапе были связаны с получением и изучением свойств фермента органофосфатгидролазы (ОРН), на основе которого затем, на втором этапе исследований, при введении гексагистидиновой ( $\text{His}_6$ ) последовательности в N-конец молекулы ОРН ( $\text{His}_6$ -ОРН) был получен рекомбинантный фермент, проявивший высокую каталитическую активность по отношению к различным ФОВ, и наконец третий этап исследований был связан с получением иммобилизованного в гелеобразующем сорбенте фермента  $\text{His}_6$ -ОРН, способного катализировать расщепление С-Р связи и осуществлять деструкцию как высокотоксичных отравляющих веществ, так и первичных продуктов их гидролиза до образования фосфорной кислоты (т. е. проводить минерализацию фосфорорганических токсичных соединений).

Использованию препаратов на основе иммобилизованных ферментов для санации почвы способствуют следующие их качества: гидролитический ферментативный процесс может быть осуществлён в нейтральных, слабощелочных и слабощелочных средах; скорость реакции минерализации достаточно высока, в силу чего достигается конверсия экотоксиканта в ограниченные промежутки времени; ферментативная нейтрализация является важным звеном экологически безопасной детоксикации ФОС; ферменты совместимы с биологическими системами, что обеспечивает экологическую безопасность самого процесса ферментативного разрушения продуктов деструкции отравляющих веществ, которыми может быть загрязнена почва [12–14, 18–23].

Созданные препараты на основе иммобилизованных ферментов для санации почвы перспективны при разложении реакционных масс в экологически безопасных условиях (без применения сильных химических окислителей и концентрированных щелочных растворов). В технологическом плане они не требуют создания высоких температур, повышенного давления и использования оборудования, изготовленного из дорогостоящих коррозионно-стойких материалов [13, 14].

В настоящее время разработана технология, в которой используется эффективный комбинированный биокатализатор в виде фермента гексагистидинсодержащей органофосфатгидролазы ( $\text{His}_6$ -ОРН) и иммобилизованных клеток псевдомонад (*Pseudomonas* sp.) деструкторов ФОС для решения таких сложных экологических задач, к которым

относится детоксикация почвы с остаточным количеством ФОВ. Способность эффективно функционирования разработанных биокатализаторов в сложных по химическому составу системах открывает новые возможности для биокаталитического, экологически безопасного решения проблем, связанных с деградацией ФОВ и продуктов их деградации [12, 14, 19–23]. Таким образом, разработка и использование ферментного комплекса His<sub>6</sub>-ОРН является одним из эффективных путей решения проблемы глубокого разложения фосфонатов.

Другим направлением экологической биотехнологии санации почвы на территории объекта УХО при его перепрофилировании является использование специально созданных биопрепаратов на основе так называемой аборигенной микрофлоры, т. е. микроорганизмов, выделенных из мест их естественной адаптации к экотоксикантам на территории объекта УХО. Данное обстоятельство даёт возможность в полной мере проявить микроорганизмам их биодegradативный потенциал в отношении широкого спектра экотоксикантов, в том числе в отношении остаточных количеств реакционных масс и продуктов детоксикации, образующихся при нейтрализации ФОВ. Микроорганизмы-деструкторы в составе биопрепарата в процессе хранения самого препарата хоть и находятся в лиофилизированном состоянии, но своей жизнеспособности они не теряют. Восстановив свою жизнеспособность после интродукции в почву, они способны взаимодействовать с почвенной микробиотой. Эта констатация отражает тот факт, что в составе экосистем и биосферы в целом имеются виды различного геологического возраста – «экогеноэлементы» экосистем [5]. Трансформирующие воздействия человеческой деятельности в общепланетарном масштабе дают основание предполагать возможность существования нисходящей ветви эволюции биосферы, а в региональных рамках – изменение такой комплексной формы поведенческой реакции микроорганизмов, как афилиация, что может проявиться нарушением клеточной агрегации и постадийной биодеструкции экотоксикантов. Таким образом, имеются определённые трудности, которые неизбежно возникают при изучении и поддержании устойчивости природных экосистем. Их преодоление возможно при условии соблюдения одного из основных экологических принципов (принципа Р. Риклефса): эффективность сообщества и его стабильность возрастают

прямо пропорционально той степени, в которой составляющие её популяции в процессе эволюции приноровились друг к другу [24]. Согласно данному принципу интродуцируемые в природную экосистему микроорганизмы, осуществляя биодеструкцию сложных по химическому составу реакционных масс, не должны нарушать динамическое равновесие между всеми компонентами в составе экосистем, поскольку именно видовое разнообразие обеспечивает стабильность экосистем. Таким образом, принцип Р. Риклефса, применённый к интродуцируемым видам микроорганизмов, используемым в биотехнологии рекультивации почвы, налагает на них и их биологические свойства определённые ограничительные рамки. Микроорганизмы не должны быть экологически чужеродными (т. е. должны относиться к так называемой аборигенной микрофлоре); они должны быть экологически безопасными, непатогенными, генетически однородными (в плане стабильности генов биодеструкции экотоксикантов), совместимыми друг с другом и с почвенными микроорганизмами, а также обладать таким важным свойством, как элиминация из экосистемы при полной деградации субстрата биодеструкции. Элиминация микроорганизмов-деструкторов из экосистемы имеет существенное значение для предотвращения процесса «депривации» микробного сообщества. Депривация или упрощение может происходить на фоне интенсивного размножения интродуцированного вида микроорганизмов, что сужает возможности менее конкурентоспособных видов и тем самым ведёт к их исчезновению или к видоизменению экологических ниш функционально близких видов, создавая предпосылки для сохранения их численности или, наоборот, массового размножения («принцип незваного гостя»); при этом может измениться всё сообщество, включая даже как будто бы не связанные с внедрившимся видом формы [5].

В естественных условиях функционирования экосистем возможны изменения количества и качества одного из экологических компонентов, ведущие к замене одной экосистемы другой, при этом не всегда желательной. Как правило, природные изменения экологических компонентов бывают непродолжительными и не выходят за рамки нормы реакции экосистемы. Искусственные изменения нередко бывают перманентными, отнюдь не всегда соотносятся с «выносливостью» экосистем и часто приводят к их деградации. Экологическая надёжность (устойчивость) экосистемы, её

способность к самовосстановлению и саморегуляции (в пределах естественных колебаний) зависит от её положения в иерархии природных образований, степени взаимодействия её компонентов и элементов (их экологической комплементарности, конгруэнтности, равновесия, экологической корреляции и оптимальности в компонентой дополненности), а также от частных приспособлений организмов (размеры, продолжительность жизни, скорость смены поколений, отношение продуктивности к биомассе и т. д.), составляющих биоту экосистемы [5]. Разнообразие, сложность и другие характеристики экосистемы имеют неоднозначное значение и зависят от эволюционной сукцессионной зрелости. Безусловно, такие тонкие качественные изменения структуры экосистемы нельзя учесть во всей полноте, когда речь идёт о санации почвы длительно функционирующего объекта УХО. Однако, несмотря на определённые различия, у экосистем имеются универсальные механизмы, которые обеспечивают их устойчивое функционирование. Именно знание и учёт этих механизмов позволили применить на практике биодеградативный потенциал микроорганизмов, выделенных из мест их естественной адаптации к экотоксикантам.

В течение последних трёх лет выполнен большой комплекс исследований по разработке технологии новой формы перспективного двухкомпонентного биопрепарата. В его состав вошли бактерии *Pseudomonas fluorescens* VG-5 и *P. putida* VG-8 – эффективные деструкторы ФОС и углеводов нефти, клубеньковые бактерии *Rhizobium loti*, сорбированные на семенах нефтотолерантного бобового растения лядвенца рогатого *Lotus corniculatus*, а также бактерии эффективного штамма-деструктора экотоксикантов *P. delhiensis* VG-11 в составе растительно-микробной ассоциации. Разрабатывались две технологии получения биопрепаратов индивидуального состава, которые, согласно их использованию, будут храниться отдельно и которые объединяются в одно целое непосредственно перед применением на местности. Важно также и то, что при конструировании биопрепаратов принимались во внимание экспериментальные данные, свидетельствующие об отсутствии на сегодняшний день универсального вида микроорганизмов, обладающих способностью осуществлять деградацию всех экотоксикантов в почве, а также и их компонентов [25]. Поэтому в состав биопрепаратов, предназначенных для рекультивации почвы, были введены предста-

вители нескольких видов микроорганизмов-деструкторов, принадлежащих к различным таксономическим группам. Таким образом, расширение возможностей биотехнологии рекультивации почвы напрямую связано с применением двухкомпонентного биопрепарата, обеспечивающего био- и фиторекультивацию почвы. В самой технологии фиторекультивации используют ассоциированные с растениями микроорганизмы. Именно микроорганизмы ризосферы растений играют ведущую роль в деградации экотоксикантов в процессе рекультивации. Общеизвестно, что в ризосфере растений присутствуют так называемые PGPR-бактерии (от англ. plant growth promoting rhizobacteria), оказывающие стимулирующее влияние на рост растений. В свою очередь, растения способны активно противодействовать экотоксикантам посредством таких процессов, как экскреция экотоксикантов и последующая их деградация до клеточных метаболитов и углекислого газа [25–28]. При этом существенно расширяется биодеградативный потенциал биопрепарата и, как следствие, возможности биотехнологии рекультивации, связанные с объединением микроорганизмов.

В технологии первого биопрепарата-деструктора ФОС, нефти и нефтепродуктов с расширенным спектром биодеградативной активности используются бактерии двух штаммов псевдомонад *P. fluorescens* VG-5 и *P. putida* VG-8 [29]. Бактерии обоих штаммов непатогенны, биосовместимы, экологически безопасны, стабильны по признаку биодеструкции экотоксикантов, неприхотливы по питательным потребностям, технологичны, не персистируют в окружающей среде при отсутствии субстрата для деструкции. Готовый к применению лиофильно обезвоженный биопрепарат представляет собой пористую массу светло-жёлтого цвета без посторонних включений. С использованием метода капиллярной газовой хроматомасс-спектрометрии с масс-селективным детектированием была установлена высокая нефтеструктурирующая активность микроорганизмов, использующих в эксперименте при выращивании на минеральных питательных средах, содержащих нефть или нефтепродукты в качестве единственного источника углерода.

В микрополевых экспериментах штаммы псевдомонад *P. fluorescens* VG-5 и *P. putida* VG-8 проявили выраженную биодеструктивную активность в отношении гербицида Раундап: содержание в почве глифосата [29, 30],

входящего в состав гербицида, снизилось к 12 суткам эксперимента с исходного количества 53,6 мг/кг до уровня 0,15 мг/кг, что ниже исходного содержания в 357 раз и меньше ПДК (0,5 мг/кг). Микроорганизмы биопрепарата совместно с почвенными микроорганизмами образуют трофические цепи и поэтапно участвуют в процессе биодеструкции поллютантов почвы. Наследственно закрепленная способность к биодеструкции экотоксикантов, детерминируемая соответствующими плазмидными генами микроорганизмов-деструкторов, делает их ведущими в инициации процесса биодеструкции как природных, так и ксенобиотических фосфонатов, а также нефти и нефтепродуктов, находящихся в почве.

Второй биопрепарат представляет собой сухую неоднородную массу, состоящую из жизнеспособных микробных клеток штаммов *P. delhiensis* VG-11 и *R. loti* [28] в соотношении 1:1 в количестве не менее  $4 \cdot 10^9$  клеток на 1 г носителя, в качестве которого выступают семена бобового растения лядвенца рогатого, объединённые с делигнифицированными опилками в соотношении 1:1 [29].

Оценка глубины деструкции глифосата [30] в почве двухкомпонентным биопрепаратом позволила сделать вывод о том, что процесс деструкции экотоксиканта наиболее интенсивно происходит в первые сутки эксперимента: к 4 суткам его содержание снизилось с исходного количества 52 мг/кг до  $11,3 \pm 2,8$  мг/кг (21,7% от исходного количества), а к 13 суткам – до  $0,12 \pm 0,03$  мг/кг, снизившись, таким образом, в 433 раза (при ПДК в почве 0,5 мг/кг).

Эксперименты с сырой нефтью, внесённой в почву, показали, что комплексное воздействие микроорганизмов (а также их ферментов) [31], входящих в состав образца двухкомпонентного биопрепарата, обуславливает на 14 сутки эксперимента деструкцию нефти с потерей её нативности примерно на 93%. Оставшиеся неизменными 7% идентифицированных методом капиллярной газовой хроматомасс-спектрометрии компонентов исходной нефти подвергаются комплексному воздействию растительно-микробной ассоциации и в последующем через три недели эксперимента фрагментируются на отдельные алканы с содержанием тяжёлых нефтяных фракций C17–C53 на уровне 15%.

### Заключение

Микроорганизмы и продукты их метаболизма вполне закономерно нашли прак-

тическое применение в биотехнологии рекультивации почвы. Эволюционируя вместе с биосферой, микроорганизмы адаптировались к различным условиям существования и расселились повсеместно, заняв различные экологические ниши. Существует мнение, что для микробного биоразнообразия, в отличие от биоразнообразия растительного и животного мира, характерно динамическое равновесие, что якобы облегчает их выделение, идентификацию и использование в биотехнологии. Однако, как показывает опыт, в действительности частота выделения искомым технофильных микроорганизмов из естественной среды обитания довольно низка и составляет менее  $1 \cdot 10^{-9}$ . В то же время специфические микробиологические методы и селективные питательные среды, а также научно-методические подходы, разработанные учёными смежных научных дисциплин, позволяют изолировать из окружающей среды такие микроорганизмы, которые обладают набором свойств, делающих их естественными участниками биотехнологических процессов, в том числе биотехнологии рекультивации почвы. Это тем более важно, что в силу специфики реализации технологий уничтожения ФОС на объекте УХО «Марадыковский» рассчитывать на самовосстановление почвы и её санацию путём активации процессов самоочищения агротехническими приёмами, внесением удобрений, поверхностной обработкой и глубоким рыхлением, оказывающими стимулирующее влияние на естественную микрофлору, не приходится. Данное обстоятельство предопределило проведение специальных исследований, связанных с использованием мощного биодеградативного потенциала микроорганизмов в биотехнологических целях.

В настоящее время для микробной биотехнологии рекультивации почвы разработаны ферментный и сугубо микробиологический подходы решения проблемы санирования и устойчивого функционирования техногенной экосистемы объекта «Марадыковский». В рамках ферментного подхода к биотехнологии рекультивации почвы созданы и апробированы высокоэффективные генетические конструкции и рекомбинантные штаммы, прежде всего кишечной палочки *E. coli* и псевдомонад *Pseudomonas* sp., обеспечивающие биосинтез органофосфатгидролазы в цитоплазме клеток, а также её генетически модифицированных аналогов, содержащих полигистидиновые последовательности в растворимой и каталитически активной форме. Экспериментально

доказана высокая эффективность органофосфатгидролазы с шестью остатками гистидина в процессах деструкции ФОВ и продуктов их деградации. Кроме того, на основе микробных клеток – продуцентов ферментов с активностью органофосфатгидролазы созданы гетерогенные биокатализаторы, которые, как и метаболически активные клетки, в составе искусственного иммобилизованного консорциума перспективны для использования в процессах разложения фосфорорганических нейротоксинов, а также в биотехнологии санирования природных экосистем объекта «Марадыковский».

Другим эффективным путём решения проблемы санирования и устойчивого функционирования экосистемы объекта «Марадыковский» является использование в биотехнологии рекультивации почвы биопрепарата-деструктора экотоксикантов, созданного на базе растительно-микробной ассоциации бактерий *Pseudomonas sp.*, *Rhizobium sp.* и бобового растения *L. corniculatus*. Микроорганизмы, входящие в состав биопрепарата-деструктора, являются не только продуцентами ферментов деструкции фосфонатов в почве, но они также формируют устойчивые трофические цепи с микроорганизмами почвенной (аборигенной) микрофлоры и за счёт синергидного эффекта биологически активных компонентов совместно участвуют в процессе биодеструкции экотоксикантов в загрязнённой почве. Наследственно закрепленная способность к биодеструкции экотоксикантов делает их ведущими в инициации процесса уничтожения природных и ксенобиотических фосфонатов, а также нефти и нефтепродуктов, находящихся в почве.

Таким образом, совокупность теоретических и экспериментальных данных свидетельствует о готовности внедрения апробированных научных разработок в практику микробной биотехнологии рекультивации почвы, которые обеспечат экологическую безопасность процесса биоразложения продуктов деструкции отравляющих веществ и восстановления экосистемы объекта «Марадыковский».

### Литература

1. Капашин В.П. Уничтожение запасов химического оружия на основе современных российских технологий // Теоретическая и прикладная экология. 2015. № 3. С. 10–13.
2. Ашихмина Т.Я., Тимонов А.С., Кантор Г.Я., Пантелева О.Г., Домнина Е.В., Дабах Е.В., Огородникова С.Ю.,

Новыйдарский Ю.В., Титова В.А. Изучение воздействия объекта уничтожения химического оружия «Марадыковский» на состояние природных сред и объектов // Теоретическая и прикладная экология. 2015. № 3. С. 88–95.

3. Домнина Е. А., Огородникова С.Ю. Изучение протективного покрытия эпифитных лишайников и содержания общего фосфора в талломах в районе действия объекта уничтожения химического оружия в Кировской области // Механизмы устойчивости и адаптации биологических систем к природным и техногенным факторам: Материалы Всероссийской научной конференции. Киров, 2015. С. 41–45.

4. Янковская А.А., Филимонов И.В., Завьялова Н.В., Голипад А.Н., Ковтун В.А. Экологически безопасная биоремедиация почвы и очистка воды *in situ* от продуктов деструкции отравляющих веществ // Теоретическая и прикладная экология. 2016. № 4. С. 89–95.

5. Реймерс Н.Ф. Экология (теории, законы, правила, принципы и гипотезы). М.: Россия Молодая, 1994. 367 с.

6. Исаева А.Ю., Романов В.С., Белов Ю.А. Различные подходы к рекультивации загрязнённых территорий в рамках выполнения ликвидационных мероприятий на бывших объектах по хранению химического оружия // Теоретическая и прикладная экология. 2015. № 3. С. 117–120.

7. Евдокимова Г.А. Почвенная микробиота как фактор устойчивости почв к загрязнению // Теоретическая и прикладная экология. 2014. № 2. С. 17–24.

8. Heigerer H. Landwirtschaft und umweltbelastung // Schriften Agrar wiss, Fachbereichs Univ. Kill. 1979. No. 51. P. 290–304.

9. ГОСТ 17.5.3.05-84. Охрана природы. Рекультивация земель. Общие требования к землеванию. М.: Каталог ГОСТ – ИПК Издательство стандартов, 2002. С. 56–59.

10. 117.5.3.06-85. Охрана природы. Земли. Требования к определению норм снятия природного слоя почвы при производстве земляных работ. М.: Каталог ГОСТ – ИПК Издательство стандартов. 2015. С. 60–63.

11. Munro N.B., Talmage S.S., Griffin G.D., Watsr L.C., Watson A.P., King J.F., Hauschidi V. The source, fate, and toxicity of chemical warfare agent degradation products // Research Reviews. 1999. V. 107. No. 12. P. 933–974.

12. Ефременко Е.Н. Гетерогенные биокатализаторы на основе иммобилизованных клеток микроорганизмов: фундаментальные и прикладные аспекты: Автореферат дис. ... докт. биол. наук. М.: Химический факультет МГУ им. М.В. Ломоносова. 2009. 51 с.

13. Уткин А.Ю., Пыжьбянов И.В., Шелученко В.В., Петрунин В.А., Капашин В.П., Холстов В.И., Кондратьев В.В. Способ уничтожения химических боеприпасов, снаряженных фосфорорганическими отравляющими веществами и имеющих в корпусе технологические резьбовые отверстия // Патент RU № 2352375. Заявка 2006133269/02, 15.09.2006. Опубликовано 20.04.2009.

14. Ефременко Е.Н., Завьялов В.В., Завьялова Н.В., Холстов В.И., Янковская А.А. Разрыв С-Р связи в фос-

фонатах под действием ферментных биокатализаторов // Теоретическая и прикладная экология. 2015. № 3. С. 47–54.

15. Small M.J. Compounds formed from the chemical decontamination of HD, GB, and VX and their environmental fate. Fort Detrick, MD: U.S. Army Medical Bioengineering research and Development Laboratory. Tech. rpt. 8304, 1984. DTIC accession no. AD-A149515.

16. Metcalf W.W., Wanner B.L. Mutational analysis of an *Escherichia coli* fourteen-gene operon for phosphonate degradation, using Tnpho A elements // J. Bacteriol. 1993. V. 175. P. 3430–3442.

17. La Nause J.M., Rosenberg H., Shaw D.S. The enzyme cleavage of the carbon-phosphorus bond: Purification and properties of phosphonate // Biochim. Biophys. Acta. 1970. V. 212. P. 332–350.

18. Cordeiro M.L., Pompliano D.L., Frost J.W. Degradation and detoxification of organophosphonates: cleavage of the carbon-phosphorus bond // J. Am. Chem. Soc. 1986. V. 108. P. 332–334.

19. Frost J.W., Loo S., Cordeiro M.L., Li D. Radical-based dephosphorylase and organophosphonate biodegradation // J. Am. Chem. Soc. 1987. V. 109. P. 2166–2177.

20. Quinn J.P., Peden J.M.M., Dick R.E. Carbon-phosphorus bond cleavage by gram-positive and gram-negative soil bacteria // Appl. Microbiol. Biotechnol. 1989. V. 31. P. 283–287.

21. Schowanec D., Verstraete W. Phosphonate utilization by bacterial cultures and enrichments from environmental samples // Appl. Microbiol. Biotechnol. 1990. V. 56. P. 895–903.

22. Avila L.Z., Draths K.M., Frost J.W. Metabolites associated with organophosphonate C-P bond cleavage: chemical synthesis and microbial degradation of [<sup>32</sup>P]-ethylphosphonic acid // Bioorg. Med. Chem. Lett. 1991. V. 1. No. 1. P. 51–54.

23. McMullan G., Quinn J.P. In vitro characterization of a phosphate starvation-independent carbon-phosphorus bond cleavage activity in *Pseudomonas fluorescens* 23F // J. Bacteriol. 1994. V. 176. No. 2. P. 320–324.

24. Риклефс Р. Основы общей экологии / Под ред. Н.Н. Каргашева. М.: Мир. 1979. 424 с.

25. Ivanova A.A., Vetrova A.A., Filonov A.E., Boronin A.M. Oil biodegradation by microbial-plant associations // Applied Biochemistry and Microbiology. 2015. T. 51. № 2. С. 196–201.

26. Shinabarger D.L., Braymer H.D. Glyphosate catabolism by *Pseudomonas* sp. strain PG2982 // J. Bacteriol. 1986. V. 168. P. 702–703.

27. Daughton C.G., Cook A.M., Alexander M. Biodegradation of phosphonate toxicants yield methane or ethane on cleavage of C-P bound // FEMS Microbiol. Lett. 1979. V. 5. No. 2. P. 91–93.

28. Rosenberg M., Gutnic G.L., Rosenberg E. Adherence of bacteria to hydrocarbons: a simple method for measuring cell-surface hydrophobicity // FEMS Microbiol. Lett. 1980. V. 9. P. 29–33.

29. Archana G. Engineering nodulation competitiveness of rhizobial bioinoculants in soil: Microbes for Legume Improvement / Eds. M.S. Khan, J. Musarrat, A. Zaidi. Wien: Springer. 2010. P. 157–194.

30. Лазыкин А.Г., Лещенко А.А., Ашихмина Т.Я., Погорельский И.П., Дармов И.В., Лундовских И.А., Устюжанин И.А., Шаров С.А. Оценка возможности использования растительно-микробных ассоциаций при рекультивации почвы на объекте «Марадьковский» // Теоретическая и прикладная экология. 2016. № 4. С. 96–104.

31. Selvapandiyan A., Bhatnagar R.K. Isolation of glyphosate-metabolising *Pseudomonas*: detection, partial purification and localization of carbon-phosphorus lyase // Appl. Microbiol. Biotechnol. 1994. V. 40. P. 876–882.

32. Квеситадзе Г.И., Хатисашвили Г.А., Садунишвили Т.А., Евстигнеева З.Г. Метаболизм антропогенных токсикантов в высших растениях / Под ред. В.О. Попова. М.: Наука. 2005. 199 с.

## References

1. Kapashin V.P. Decommission of chemical weapons stores using contemporary techniques worked out in Russia // Teoreticheskaya i prikladnaya ekologiya. 2015. No. 3. P. 10–13 (in Russian).

2. Ashikhmina T.Ya., Timonov A.S., Kantor G.Ya., Panteleva O.G., Domnina E.V., Dabakh E.V., Ogorodnikova S.Yu., Novoidarskiy Yu.V., Titova V.A. Research of the impact of the chemical weapons decommission plant “Maradykovskiy” on the state of natural environment and its objects // Teoreticheskaya i prikladnaya ekologiya. 2015. No. 3. P. 88–95 (in Russian).

3. Domnina E.A., Ogorodnikova S.Yu. The study of the protective coating of epiphytic lichens and the content of total phosphorus in thalloms in the area of action of the chemical weapons destruction plant in the Kirov region // Mechanisms of stability and adaptation of biological systems to natural and technogenic factors: Materialy Vserossiyskoy nauchnoy konferentsii. Kirov, 2015. P. 41–45 (in Russian).

4. Yankovskaya A.A., Filimonov I.V., Zavjalova N.V., Golipad A.N., Kovtun V.A. Ecologically safe bioremediation of soil and water purification in situ from chemical warfare agents destruction products // Teoreticheskaya i prikladnaya ekologiya. 2016. No. 4. P. 89–95 (in Russian).

5. Reymers N.F. Ecology (theories, laws, rules, principles, and hypotheses). М.: Rossiya Molodaya, 1994. 367 p. (in Russian).

6. Isaeva A.Yu., Romanov V.S., Belov Yu.A. Different approaches to remediation of contaminated areas as a part of liquidation activities at the former chemical weapons storage sites // Teoreticheskaya i prikladnaya ekologiya. 2015. No. 3. P. 117–120 (in Russian).

7. Evdokimova G.A. Soil microbiota as a factor of soil resistance to contamination // Teoreticheskaya i prikladnaya ekologiya. 2014. No. 2. P. 17–24 (in Russian).

8. Heigerer H. Landwirtschaft und umweltbelastung // Schriften Agrar wiss, Fachbereichs Univ. Kill. 1979. No. 51. P. 290–304.
9. GOST 17.5.3.05-84. Protection of Nature. Reclamation of lands. General requirements for land. Moskva: IPK Izdatelstvo standartov, 2002 (in Russian).
10. GOST 17.5.3.06-85. Protection of Nature of the Earth. Requirements for determining the norms for removing the natural layer of soil during excavation work. Moskva: IPK Izdatelstvo standartov. 2015 (in Russian).
11. Munro N.B., Talmage S.S., Griffin G.D., Watrs L.C., Watson A.P., King J.F., Hauschidi V. The source, fate, and toxicity of chemical warfare agent degradation products // Research Reviews. 1999. V. 107. No. 12. P. 933–974.
12. Efremenko E.N. Heterogeneous biocatalysts based on immobilized cells of microorganisms: fundamental and applied aspects: Avtoref. ... dokt. biol. nauk. Moskva: Chimicheskiiy facultet MGU im. M.V. Lomonosova. 2009. 51 p. (in Russian).
13. Utkin A.Yu., Pyzhyanov I.V., Sheluchenko V.V., Petrunin V.A., Kapashin V.P., Holstov V.I., Kondratyev V.V. The method of destruction of chemical munitions, equipped with organophosphorus poisonous substances and having in the body technological threaded holes // Patent RU № 2352375. Zayavka: 2006133269/02, 15.09.2006. Opublikovano: 20.04.2009 (in Russian).
14. Efremenko E.N., Zavyalov V.V., Zavyalova N.V., Holstov V.I., Yankovskaya A.A. Cleavage of C-P bond in phosphonates under the action of enzymatic biocatalysts // Teoreticheskaya i prikladnaya ecologiya. 2015. No. 3. P. 47–54 (in Russian).
15. Small M.J. Compounds formed from the chemical decontamination of HD, GB, and VX and their environmental fate. Fort Detric, MD: U.S. Army Medical Bioengineering research and Development Laboratory. Tech. rpt. 8304, 1984. DTIC accession no. AD-A149515.
16. Metcalf W.W., Wanner B.L. Mutational analysis of an Escherichia coli fourteen-gene operon for phosphonate degradation, using TnpA elements // J. Bacteriol. 1993. V. 175. P. 3430–3442.
17. La Nause J.M., Rosenberg H., Shaw D.S. The enzyme cleavage of the carbon-phosphorus bond: Purification and properties of phosphonate // Biochim. Biophys. Acta. 1970. V. 212. P. 332–350.
18. Cordeiro M.L., Pompliano D.L., Frost J.W. Degradation and detoxification of organophosphonates: cleavage of the carbon-phosphorus bond // J. Am. Chem. Soc. 1986. V. 108. P. 332–334.
19. Frost J.W., Loo S., Cordeiro M.L., Li D. Radical-based dephosphorylase and organophosphonate biodegradation // J. Am. Chem. Soc. 1987. V. 109. P. 2166–2177.
20. Quinn J.P., Peden J.M.M., Dick R.E. Carbon-phosphorus bond cleavage by gram-positive and gram-negative soil bacteria // Appl. Microbiol. Biotechnol. 1989. V. 31. P. 283–287.
21. Schowanec D., Verstraete W. Phosphonate utilization by bacterial cultures and enrichments from environmental samples // Appl. Microbiol. Biotechnol. 1990. V. 56. P. 895–903.
22. Avila L.Z., Draths K.M., Frost J.W. Metabolites associated with organophosphonate C-P bond cleavage: chemical synthesis and microbial degradation of [32P]-ethylphosphonic acid // Bioorg. Med. Chem. Lett. 1991. V. 1. No. 1. P. 51–54.
23. McMullan G., Quinn J.P. In vitro characterization of a phosphate starvation-independent carbon-phosphorus bond cleavage activity in *Pseudomonas fluorescens* 23F // J. Bacteriol. 1994. V. 176. No. 2. P. 320–324.
24. Riklifs R. Fundamentals of general ecology / Ed. N.N. Kartashev. Moskva: Mir, 1979. 424 p. (in Russian).
25. Ivanova A.A., Vetrova A.A., Filonov A.E., Boronin A.M. Oil biodegradation by microbial-plant associations // Applied Biochemistry and Microbiology. 2015. T. 51. № 2. C. 196-201.
26. Shinabarger D.L., Braymer H.D. Glyphosate catabolism by *Pseudomonas* sp. strain PG2982 // J. Bacteriol. 1986. V. 168. P. 702–703.
27. Daughton C.G., Cook A.M., Alexander M. Biodegradation of phosphonate toxicants yield methane or ethane on cleavage of C-P bond // FEMS Microbiol. Lett. 1979. V. 5. № 2. P. 91–93.
28. Rosenberg M., Gutnic G.L., Rosenberg E. Adherence of bacteria to hydrocarbons: a simple method for measuring cell-surface hydrophobicity // FEMS Microbiol. Lett. 1980. V. 9. P. 29–33.
29. Archana G. Engineering nodulation competitiveness of rhizobial bioinoculants in soil: Microbes for Legume Improvement / Eds. M.S. Khan, J. Musarrat, A. Zaidi. – Wien: Springer. 2010. P. 157–194.
30. Lazykin A.G., Leshchenko A.A., Ashikhmina T.Ya., Pogorelsky I.P., Darmov I.V., Lundovskikh I.A., Ustyuzhanin I.A., Sharov S.A. Assessment of the possibility of using plant-microbial associations in biotechnology of soil remediation at the facility «Maradykovskiy» // Teoreticheskaya i prikladnaya ecologiya. 2016. No. 4. P. 96–104 (in Russian).
31. Selvapandiyam A., Bhatnagar R.K. Isolation of glyphosate-metabolising *Pseudomonas*: detection, partial purification and localization of carbon-phosphorus lyase // Appl. Microbiol. Biotechnol. 1994. V. 40. P. 876–882.
32. Kvesitadze G.I., Hatisachvili G.A., Sadunishvili T.A., Evstigneeva Z.G. Metabolism of anthropogenic toxicants in higher plants / Ed. V.O. Popov. Moskva: Nauka, 2005. 199 p. (in Russian).

## Направления использования биотехнологических способов при ликвидации последствий работы объектов по уничтожению химического оружия

© 2017. А. А. Янковская<sup>1</sup>, офицер отдела, И. В. Филимонов<sup>2</sup>, к. т. н., с. н. с.,  
Н. В. Завьялова<sup>2</sup>, д. б. н., профессор, г. н. с., Е. Н. Ефременко<sup>3</sup>, д. б. н.,  
зав. лабораторией, В. И. Холстов<sup>4</sup>, д. х. н., профессор, руководитель центра

<sup>1</sup>Федеральное управление по безопасному хранению  
и уничтожению химического оружия,  
115487, Россия, г. Москва, ул. Садовники, 4-а,

<sup>2</sup>27 Научный центр Министерства обороны Российской Федерации,  
105005, Россия, г. Москва, Бригадирский переулок, 13,

<sup>3</sup>Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова,  
119234, Россия, г. Москва, ул. Воробьёвы горы, 1,

<sup>4</sup>Федеральное государственное унитарное предприятие “Государственный  
научно-исследовательский институт органической химии и технологий”,  
111024, Россия, г. Москва, шоссе Энтузиастов, 23,  
e-mail: fubhuho@mail.ru

При проведении мероприятий по ликвидации последствий работы объектов по уничтожению химического оружия предлагается использование биотехнологических способов деструкции продуктов детоксикации отравляющих веществ (ОВ). Биотехнологические способы предусматривают обязательное применение биокатализаторов на основе микроорганизмов-деструкторов (или их консорциумов) и продуцируемых ими ферментов. Биотехнологические способы позволяют провести: обезвреживание контактировавшего с ОВ оборудования и стройматериалов, очистку *in situ* или *ex situ* территорий, на которых хранилось химическое оружие, санацию объектов по хранению и уничтожению химического оружия. При этом реабилитационные работы возможно выполнять на значительных площадях при различных концентрациях загрязнителей без накопления токсичных вторичных продуктов за счёт полной их минерализации. Предлагается дорожная карта экологически безопасного проведения реабилитационных работ с использованием биотехнологических способов. При её разработке использованы данные теоретических и экспериментальных исследований по созданию биокатализаторов на основе микроорганизмов-деструкторов и ферментов, а также обеззараживающих пенных покрытий.

**Ключевые слова:** биокатализаторы, микроорганизмы-деструкторы, ферменты, продукты детоксикации токсичных веществ, пенные покрытия, биоремедиация почвы, очистка воды, органофосфатгидролазы.

## Directions for use of biotechnological methods of liquidating the consequences of chemical weapons destruction

A. A. Yankovskaya<sup>1</sup>, I. V. Filimonov<sup>2</sup>, N. V. Zavyalova<sup>2</sup>,  
E. N. Efremenko<sup>3</sup>, V. I. Kholstov<sup>4</sup>,

<sup>1</sup>Federal Directorate for Safe Storage and Destruction of Chemical Weapons,  
4a, Sadovniki St., Moscow, Russia, 115487,

<sup>2</sup>27 Research center of the Russian Ministry of Defense,  
13, Pereulok Brigadirskiy, Moscow, Russia, 105005,

<sup>3</sup>Lomonosov Moscow State University,  
1 Leninskie gory, Moscow, Russia, 119991,

<sup>4</sup> Federal State Unitary Enterprise “State Scientific Research Institute  
of Organic Chemistry and Technology”,  
23 Highway Enthusiasts, Moscow, Russia, 1110,  
e-mail: fubhuho@mail.ru

When carrying out measures on eliminating consequences of chemical weapons destruction plants operating, using biotechnological methods of destruction of poisonous substances degradation products is offered. Biotechnological methods require the use of biocatalysts on the basis of destructor microorganisms and the enzymes produced by them. Biotechnological methods allow carrying out neutralization in contact with toxic substances equipment and materials, cleaning in situ or ex situ areas, which contained chemical weapons, reorganization of chemical weapons storage and destruction plants. In this case rehabilitation works can be performed on large areas with different concentrations of pollutants without accumulation of toxic secondary products due to their complete mineralization. A roadmap for environmentally safe rehabilitation works using biotechnological methods is proposed. In its development, the data of theoretical and experimental studies on creation of biocatalysts based on microorganisms-destructors and enzymes, as well as disinfecting foam coatings, were used.

**Keywords:** biocatalysts, destructor microorganisms, enzymes, products of detoxification of toxic substances, foam coatings, bioremediation of soil and water purification, organophosphate hydrolases.

Уничтожение химического оружия в России в настоящее время подходит к своему завершению. За весь период эксплуатации всех семи объектов по уничтожению химического оружия (УХО) не было зафиксировано случаев поражения отравляющими веществами работающего персонала и населения, проживающего вблизи объектов. Также в регионах хранения и уничтожения химического оружия не было зафиксировано фактов нанесения ущерба окружающей среде [1, 2].

Руководство страны намерено использовать высвобожденные производственные мощности объектов УХО в интересах оборонного или хозяйственного значения. Для этого необходимо провести комплекс работ по выводу этих объектов из эксплуатации, в частности создать технологические линии по обеззараживанию контактировавшего с ОВ оборудования и стройматериалов; санацию и рекультивирование территорий, на которых хранилось химическое оружие [1].

Это не простая и достаточно продолжительная работа по времени, которая должна быть реализована в рамках Федеральной целевой программы «Ликвидация последствий деятельности объектов по хранению и объектов по уничтожению химического оружия в Российской Федерации на 2017–2022 годы» [1].

Перепрофилирование объектов – наиболее актуальный вопрос современности. Оно предусматривает ликвидацию последствия деятельности объектов УХО, для чего необходимо полностью избавиться от опасных отходов. Осуществить дегазацию оборудования, задействованного в процессе уничтожения. Провести реабилитационные работы на промплощадках, где размещены объекты УХО [2].

Федеральной целевой программой «Уничтожение запасов химического оружия в Российской Федерации» [3] и Санитарными правилами СП 2.2.1.2513-09 [4] предусмотрено проведение работ по санации загрязнённых территорий, на которых были расположены

объекты по производству или разработке, хранению и уничтожению химического оружия после завершения всех работ и выведения их из эксплуатации, однако в этих документах нет указаний о конкретных технологиях очистки территорий. Поэтому разработка и выбор наиболее перспективных из них является важной задачей на этапе ликвидации последствий работы объектов по уничтожению химического оружия [5].

Необходимость разработки технологий по санации связана с тем, что загрязнения могут быть причиной таких последствий, как торможение хода почвообразовательных процессов и самоочищения почв, снижение урожайности, накопление вредных веществ в окружающей среде, в водных бассейнах, в растениях, которые прямо или опосредованно могут оказывать влияние на организм человека [5].

#### Направления использования биотехнологических способов при ликвидации последствий работы объектов УХО

При ликвидации последствий работы объектов УХО могут быть применены физические, химические, физико-химические и биотехнологические способы или их комбинации.

Биотехнологические способы могут быть использованы в следующих направлениях ликвидации последствий работы объектов УХО:

- обезвреживание контактировавшего с ОВ оборудования и стройматериалов;
- очистка территорий (ремедиация почвы, и очистка воды), на которых хранилось химическое оружие;
- реабилитационные работы in situ или ex situ на промплощадках объектов уничтожения химического оружия.

Все биотехнологические способы основываются на биокатализаторах – микроор-

ганизмах-деструкторах или их консорциумах и продуцируемых ими ферментах.

Применение биотехнологических способов, согласно оценкам экспертов, для обезвреживания оборудования и строительных материалов, очистки территорий (ремедиации почвы и очистки воды), реабилитационных работ *in situ* или *ex situ* на промплощадках объектов УХО значительно экономичнее традиционных физико-химических способов. Применение биокатализаторов на основе клеток-деструкторов примерно в 50–100 раз дешевле принятых химических или физических методов [6–9].

Кроме того, биотехнологические способы позволяют решить проблему вторичных загрязнений, так как разрушение токсичных ксенобиотиков проводится без накопления вредных вторичных продуктов. Благодаря использованию ферментов, специальных анаэробных или аэробных штаммов микроорганизмов-деструкторов или их консорциумов возможно осуществить обеззараживание значительных объёмов и концентраций загрязнителей, а также больших территорий. Бионейтрализация продуктов химического разрушения ОБ делает процесс их уничтожения необратимым за счёт минерализации загрязнителей [10–16].

### Дорожная карта биотехнологических экологически безопасных реабилитационных работ

Создание «Дорожной карты биотехнологических экологически безопасных реабилитационных работ» («Дорожной карты») базировалось на: анализе данных научной литературы и собственных исследований в области получения биопрепаратов (биокатализаторов); разработке биотехнологий биоремедиации почвы и очистки воды, загрязнённых токсичными химикатами, в том числе ОБ, и продуктами их химического разрушения; выборе ферментов и штаммов микроорганизмов, обладающих высокой деструктурирующей способностью и достаточной толерантностью к ФОВ, люизиту, иприту и продуктам их разрушения; анализе и выборе методов аналитического контроля процессов биодеструкции загрязнителей в почве и воде; на исследованиях по созданию ферментсодержащих пенных покрытий для обезвреживания контактировавшего с ОБ оборудования и строительных материалов.

Важное значение при формировании «Дорожной карты» имели данные, полученные

при ранее проведённых исследованиях по обоснованию биотехнологических способов и разработке схем получения экобиопрепаратов на основе ферментов и штаммов микроорганизмов-деструкторов фосфорорганических отравляющих веществ, иприта, люизита и продуктов их деструкции, разработке технологий и принципиальных технологических схем биоремедиации (очистки и восстановления) почвы и воды с помощью этих биопрепаратов, разработке стадий технологий биоремедиации почвы и очистки воды *in situ* и *ex situ*, созданию рецептуры ферментсодержащих пенных покрытий [17].

Разработанная «Дорожная карта», приведена на рисунке, представляет собой пошаговый порядок действий при использовании биотехнологических способов для обезвреживания контактировавшего с ОБ оборудования и строительных материалов; очистки территорий (ремедиация почвы и очистка воды), на которых хранилось химическое оружие; реабилитационных работ *in situ* или *ex situ* на промплощадках объектов УХО.

По нашему мнению, прежде чем приступить к обеззараживанию контактировавшего с ОБ оборудования и строительных материалов, очистке территорий (ремедиация почвы и очистка воды), на которых хранилось химическое оружие и реабилитационных работ *in situ* или *ex situ* на промплощадках объектов УХО при помощи биотехнологических способов, следует провести тщательный анализ поверхностей оборудования и строительных материалов, территорий, на которых хранилось химическое оружие и промплощадок объектов УХО. Установить тип токсичного соединения, его концентрации, как на поверхности оборудования и строительных материалов, так и в почве и воде. Определить глубину проникания токсичных соединений и продуктов их деструкции в почву, тип почвы, влажность и pH, процентное содержание гумуса на территориях, где хранилось химическое оружие и на промплощадках объектов УХО, а также глубину залегания грунтовых вод и их загрязнённость. То есть при обнаружении загрязнённых поверхностей оборудования, строительных материалов и территорий провести комплексное обследование и составить характеристику. Далее необходимо отобрать пробы с загрязнённого оборудования, строительных материалов, территорий и установить жизнеспособность природных микроорганизмов в почве и воде.

Такое обследование является **первым шагом** в порядке действий при проведении биотехнологических реабилитационных работ.

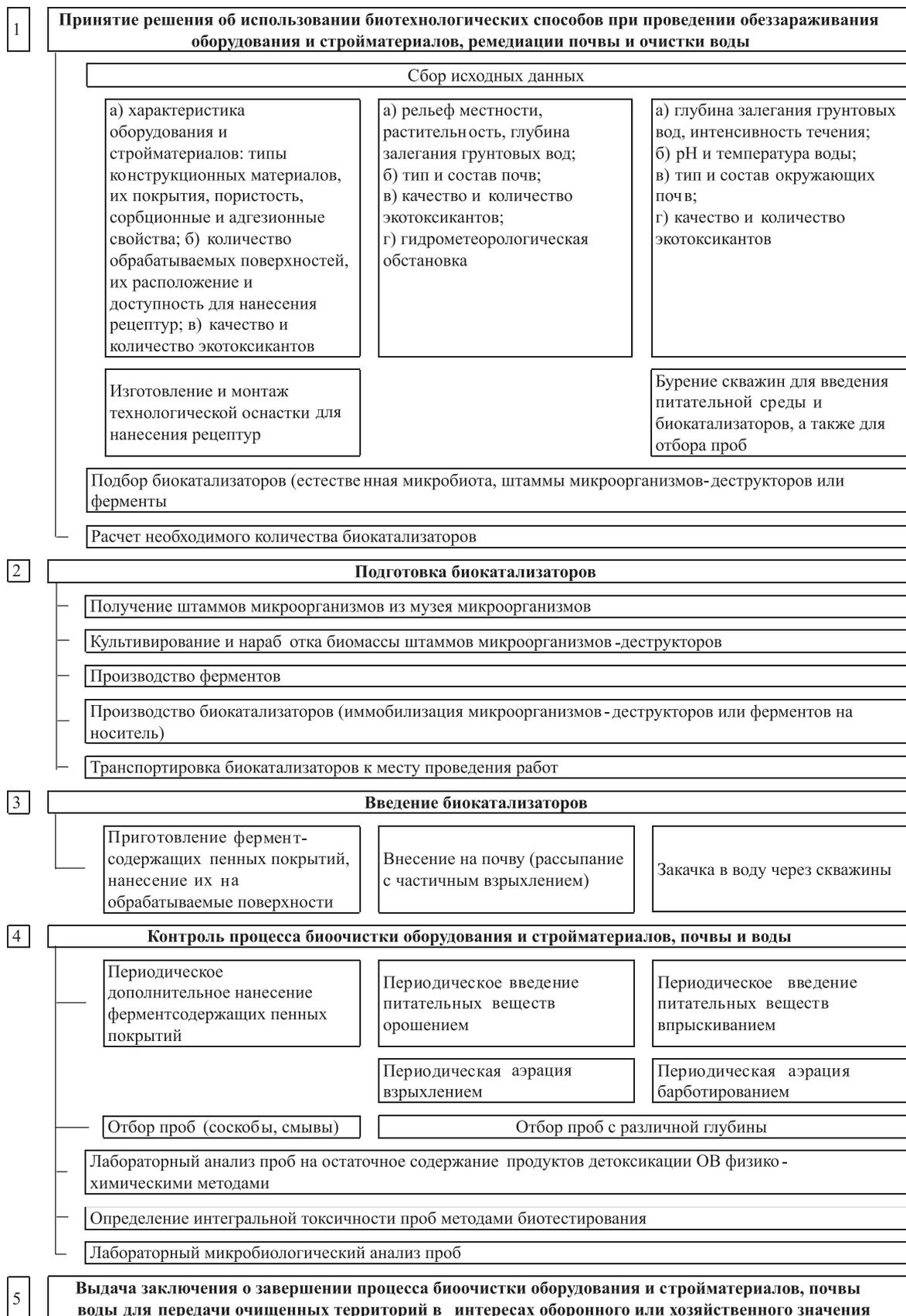


Рис. Дорожная карта экологически безопасного проведения реабилитационных работ с использованием биотехнологических способов

По его результатам должны быть составлены карты-схемы с отображением информации (выявленных границ распределения специфических загрязняющих веществ на исследуемых поверхностях оборудования, стройматериалов и территориях; их концентрации); разработаны исходные данные для выполнения комплекса мероприятий по приведению в безопасное состояние загрязнённых поверхностей и территорий; принято решение о проведении биотехнологического обеззараживания, биоремедиации и очистки; разработан алгоритм проведения биотехнологического обеззараживания, биоремедиации и очистки; осуществлен выбор технологических операций (в зависимости от установленного качественного и количественного показателя загрязнения), которые будут использованы для обеззараживания поверхностей оборудования и стройматериалов, биоремедиации почвы и очистки воды.

Одновременно проводится подбор биокатализаторов к установленным загрязнителям, расчёт необходимого их количества, определяется объём поверхностей оборудования и стройматериалов, которые будут обрабатываться ферментсодержащими пенными покрытиями, ведётся подготовка к проведению биоремедиации почвы и очистки воды (бурение скважин для введения питательной среды (веществ) и отбор проб на загрязнённых территориях, на которых хранилось химическое оружие и промплощадок объектов УХО.

В случаях наличия загрязнений люизитом или продуктами его деструкции необходимо проведение обработки почвы и воды биоокисляющими бактериями, которые переведут загрязнения, содержащие мышьяк, в растворимую форму (в раствор) и сконцентрируют его в клетках этих микроорганизмов.

**Вторым шагом** в порядке действий при проведении биотехнологических способов обезвреживания контактировавшего с ОВ оборудования и стройматериалов, очистки территорий, на которых хранилось химическое оружие, реабилитационных работ *in situ* или *ex situ* на промплощадках объектов УХО является подготовка биокатализаторов (производство, наработка необходимого количества и их иммобилизация, транспортировка к месту проведения работ); определение возможности использования природной микрофлоры; определение жизнеспособности естественной биоты; подбор микроорганизмов и растений для восстановления окружающей среды; определение степени биодеструкции загрязни-

телей; определение количества необходимых питательных веществ для природных микроорганизмов и штаммов-деструкторов.

**Третьим шагом** в порядке действий при проведении биотехнологического обеззараживания является приготовление ферментсодержащих пенных покрытий и обработка ими контактировавшего с ОВ оборудования и стройматериалов, внесение в почву рассыпанием и закачка в воду через скважины биокатализаторов.

**Четвертым шагом** является осуществление контроля за процессом биотехнологического обеззараживания контактировавшего с ОВ оборудования и стройматериалов, биоремедиации почвы и очистки воды территорий, на которых хранилось химическое оружие и реабилитационных работ *in situ* или *ex situ* на промплощадках объектов уничтожения химического оружия. Периодическое введение питательных веществ орошением на почву и закачка через скважины; периодическая аэрация взрыхлением; отбор проб; проведение токсикологических тестов проб; определение периода разрушения загрязнителей поверхности оборудования, стройматериалов, почвы и воды; определение степени обеззараживания оборудования и стройматериалов, биоремедиации почвы и очистки воды аналитическими методами.

**Пятым шагом** в порядке действий при проведении биотехнологического обеззараживания поверхностей оборудования и стройматериалов, биоремедиации почвы и очистки воды – составление заключения об эффективности проведённого обеззараживания, санации почвы и очистки воды; выдача заключения о завершении реабилитационных работ; передача очищенных территорий в интересах оборонного или хозяйственного значения.

### Использование ферментсодержащих пенных покрытий для обеззараживания поверхности оборудования и стройматериалов

Задача деградации нейротоксичных фосфорорганических соединений (ФОС), к числу которых относятся боевые отравляющие вещества (зарин, зоман, вещество типа ви-икс), их реакционные массы, а также применяемые в сельском хозяйстве пестициды (параоксон, хлорпирифос, метилпаратион, малатион), является наиболее значимой в проблеме экологической безопасности.

Детоксикация различных ФОС с помощью биокаталитических систем имеет ряд преимуществ, а именно: она проходит в мягких условиях (не требуются сильно щелочная среда, повышенные температуры, агрессивные химические агенты). Продукты гидролиза, как правило, являются биологически деградируемыми. В качестве биокатализаторов особый интерес представляют различные ферменты, гидролизующие ФОС. На сегодняшний день установлено, что наиболее высокоэффективным действующим ферментом для биодеструкции ФОС является органофосфатгидролаза (ОФГ ЕС 3.1.8.1), катализирующая гидролиз эфирной связи в триэфирах ортофосфорной и фосфоновой кислот.

Идея использования ферментов, в частности органофосфатгидролазы (ОФГ), в составе пенных композиций не нова. Так, американские исследователи впервые апробировали использование высокоочищенного фермента ОФГ для введения в «пенные системы» в начале 2000-х годов. В частности, они смешивали ОФГ со «стандартным» пенообразователем для пожаротушения «First Defense», подвергали полученную смесь механическому вспениванию в течение 30–40 с и полученной пеной обрабатывали поверхность, загрязнённую ФОС. Остаточная ферментативная активность, определённая в жидкой фазе, после оседания пены, составляла 10% от изначально внесённой активности. Тем не менее такой активности было достаточно, чтобы в течение 60 минут полностью гидролизовать пестицид параоксон, нанесённый в концентрации 0,72 г/м<sup>2</sup> и распределённый по поверхности в виде слоя пены высотой 1,2 см, который был сформирован из раствора ОФГ (3,4 мг белка/л) с исходной активностью 8,9 ед./см<sup>3</sup> или 8900,0 ед./л. Показано, что увеличение концентрации загрязняющего вещества в 5,8 раза (до 4,2 г параоксона/м<sup>2</sup>) потребовало увеличения ферментативной активности, присутствовавшей в составе пены, в 4,6 раза, но при этом степень разложения параоксона за 60 мин составила только 70% [18].

В исследованиях, проведённых в 27 Научном центре Минобороны России совместно с МГУ имени М.В. Ломоносова (химический факультет) [19, 20], была изучена дегазирующая способность пенного покрытия на основе фермента органофосфатгидролазы, содержащей гексагистидиновою последовательность (His<sub>6</sub>-ОФГ). В качестве испытуемого вещества также использовали параоксон.

Пенное покрытие получали миксерной технологией из раствора пенообразователя ПО-

РЗА в 0,1 М карбонатном буфере (рН = 10,5) при смешивании его с ферментным препаратом при комнатной температуре. Полученная пена имела коэффициент увеличения объёма равный 10. Установлено, что в течение последующих 30 мин высота уровня пены не изменялась и сохранялась достаточная активность фермента. Для сохранения большей активности фермента His<sub>6</sub>-ОФГ необходима его стабилизация путём проведения иммобилизации.

В дальнейшем для проверки возможности использования пенных покрытий для деструкции ФОС, было проведено испытание работы фермента His<sub>6</sub>-ОФГ в составе пены при ликвидации разлива раствора параоксона на поверхности стройматериалов.

Для этого на два образца кафельной плитки с остатками старой штукатурки (площадью примерно 29–38 см<sup>2</sup>) было нанесено по 0,2 мл 2,75 г/л водного раствора параоксона (среднее загрязнение 0,14–0,19 г/м<sup>2</sup>). Затем на образцы наносили пенное покрытие без фермента и пенное покрытие с добавлением фермента His<sub>6</sub>-ОФГ, слоем толщиной 2–3 см.

Через 5–10 мин с помощью шпателя освобождали некоторые участки поверхности от пены. В случае использования пены с ферментом His<sub>6</sub>-ОФГ на открытых поверхностях кафельной плитки наблюдали окраску пены в жёлтый цвет за счёт образования *p*-нитрофенола – продукта гидролиза параоксона. В случае использования пенного покрытия без фермента такая окраска отсутствовала.

По нашему мнению, пенные покрытия, содержащие фермент, могут быть использованы, кроме обеззараживания поверхностей оборудования и стройматериалов, также и для локализации аварийных проливов, проведения мероприятий по специальной обработке объектов и техники, почвы, вертикальных поверхностей, обмундирования личного состава в условиях химического заражения, в зонах чрезвычайных ситуаций, при утилизации токсичных веществ, вредных для здоровья и окружающей среды.

### Заключение

При ликвидации последствий работы объектов по уничтожению химического оружия биотехнологические способы деструкции продуктов детоксикации отравляющих веществ могут быть использованы в следующих направлениях:

- обезвреживание контактировавшего с ОВ оборудования и стройматериалов;

– очистка территорий (ремедиация почвы, и очистка воды), на которых хранилось химическое оружие;

– реабилитационные работы *in situ* или *ex situ* на промплощадках объектов уничтожения химического оружия.

Разработанная дорожная карта представляет собой пошаговый порядок действий экологически безопасного проведения реабилитационных работ с использованием биотехнологических способов.

### Литература

1. Капашин В.П., Холстов В.И., Кондратьев В.Б. 20 лет со дня принятия целевой программы «Уничтожение запасов химического оружия в Российской Федерации» // Теоретическая и прикладная экология. 2016. № 4. С. 6–11.

2. Холстов В.И. Итоги реализации Федеральной целевой программы «Уничтожение запасов химического оружия в Российской Федерации» в преддверии 2014 года // Теоретическая и прикладная экология. 2013. № 4. С. 6–7.

3. Федеральная целевая программа «Уничтожение запасов химического оружия в Российской Федерации». Постановление Правительства РФ от 21.03.1996 г. № 305 и от 5.07.2001. № 510.

4. Санитарные правила СП 2.2.1.2513-09 «Гигиенические требования к размещению, проектированию, строительству, эксплуатации и перепрофилированию объектов по уничтожению химического оружия, реконструкции зданий и сооружений и выводу из эксплуатации объектов по хранению химического оружия». 2009.

5. Янковская А.А., Филимонов И.В., Завьялова Н.В., Голипад А.Н., Ковтун В.А., Холстов В.И. Экологически безопасная биоремедиация почвы и очистки воды *in situ* от продуктов деструкции отравляющих веществ // Теоретическая и прикладная экология. 2016. № 4. С. 89–95.

6. Ефременко Е.Н., Лягин И.В., Гудков Д.А., Сироткина М.С., Завьялова Н.В., Варфоломеев С.Д., Холстов В.И. Имобилизованные биокатализаторы на основе органофосфатгидролазы в процессах разложения фосфорорганических отравляющих веществ // Теоретическая и прикладная экология. 2011. № 4. С. 26–31.

7. De Frank J.J., Cheng Tu-Chen, Rolakowsky G.E., Harvey S. Advances in the biodegradation of chemical warfare agents and related materials // Advances in the biodegradation of chemical warfare agents and related materials: Abstr. Keystone symp. Environ. Biotechnol, Lake Tahoe, Calif. Cell. Biochem. 1995. 21 а. P. 41.

8. Завьялова Н.В., Филимонов И.В., Ефременко Е.Н., Холстов В.И., Янковская А.А. Биокатализаторы на основе штаммов микроорганизмов и ферментов, обладающих повышенной способностью к разложению

отравляющих веществ и продуктов их деструкции, в процессе очистки почв и вод // Теоретическая и прикладная экология. 2014. № 4. С. 42–50.

9. Завьялова Н.В., Филимонов И.В., Ефременко Е.Н., Холстов В.И., Янковская А.А. Биотехнологические методы и нейтрализующие средства для обеззараживания почв и очищения вод, загрязнённых экотоксикантами // Теоретическая и прикладная экология. 2014. № 4. С. 25–32.

10. Ефременко Е.Н., Лягин И.В., Гудков Д.А., Степанов Н.А., Сенько О.В., Маслова О.В., Ковалёв Д.А., Завьялова Н.В., Холстов В.И., Янковская А.А. Комбинированное применение ферментативного и бактериального биокатализаторов в процессах биодеструкции ФОВ и продуктов их разложения // Теоретическая и прикладная экология. 2015. № 3. С. 35–39.

11. Funk S.B., Roberts D.J., Crawford D.J. Initial phase optimization for bioremediation of munitions compound-contaminated soils // Appl. Env. Microb. 1992. V. 59. No.7. P. 2171–2177.

12. Kaake R.H., Roberts D.J., Stevens T.O. et al. Bioremediation of soils contaminated with the herbicide 2-secbuty1-4, 6-dinitrophenol (dinoseb) // Appl. Env. Microb. 1990. V. 56. No. 6. P. 1666–1671.

13. Howard J., Fox S. Review of current research projects and innovations in remediation // Gen. Eng. News. 1994. V. 14. No. 17. P. 8–9.

14. Smith J.D. Metabolism of phosphonates // The role of phosphonates in living systems. CRC Press, Boca Raton. 1983. P. 31–54.

15. Small M.J. Compounds formed from the chemical decontamination of HD, GB, and VX and their environmental fate // Tech Rpt 8304; AD A149515. Fort Detrick, MD: U.S. Army Medical Bioengineering Research and Development Laboratory, 1984.

16. Shames S.L., Wackett L.P., LaBarge M.S., Kuczowski R.L., Walsh C.T. Fragmentative and stereochemical isomerisation probes for homolytic carbon to phosphorus bond scission catalysed by bacterial carbon-phosphorus lyase // Bioorg. Chem. 1987. V. 15. P. 366–373.

17. Завьялова Н.В., Филимонов И.В., Ковтун В.А., Голипад А.Н., Петров С.В., Стяжкин К.К., Ефременко Е.Н., Холстов В.И., Янковская А.А. Основные технологические операции и стадии биоремедиации почв и очистки вод *in situ* // Теоретическая и прикладная экология. 2014. № 4. С. 33–40.

18. Lejeune K.E., Russell A.J. Biocatalytic nerve agent detoxification in firefighting foams // Biotechnol. Bioeng. 1999. V. 62 (6). P. 659–665.

19. Efremenko E.N., Sergeeva V.S. Organophosphate hydrolase – an enzyme catalyzing degradation of phosphorus-containing toxins and pesticides // Russian Chemical Bulletin. 2001. V. 50. No 10. P. 1826–1832.

20. Ефременко Е.Н., Лягин И.В., Завьялов В.В., Варфоломеев С.Д., Завьялова Н.В., Холстов В.И. Ферменты в технологии уничтожения фосфорорганических

отравляющих веществ // Российский химический журнал. 2007. № 51 (2). С. 24–29.

## References

1. Kapashin V.P., Kholstov V.I., Kondratiev V.B. Results of the federal target program «Destruction of chemical weapons stockpiles in the Russian Federation» on the eve of 2014 // *Teoreticheskaya i prikladnaya ekologiya*. 2016. No. 4. P. 6–11 (in Russian).

2. Kholstov V.I. Result of the federal target programm “Destruction of chemical weapons stockpiles in the Russian Federation on the eve 2014 // *Teoreticheskaya i prikladnaya ekologiya*. 2013. No. 4. P.6–7 (in Russian).

3. Federal Target Program “Destruction of chemical weapons stockpiles in the Russian Federation”. Postanovleniye pravitelstva RF ot 21.03.1996. No. 305 i ot 5.07.2001. No. 510 (in Russian).

4. Sanitary rules SP 2.2.1.2513-09 “Hygienic requirements to location, design, construction, operation, and conversion of chemical weapons destruction plants, reconstruction of buildings and structures and decommissioning storage facilities of chemical weapons. 2009 (in Russian).

5. Yankovskaya A.A., Filimonov I.V., Zavjalova N.V., Golipad A.N., Kovtun V.A. Ecologically safe bioremediation of soil and water purification *in situ* from chemical warfare agents destruction products // *Teoreticheskaya i prikladnaya ekologiya*. 2016. No. 4. P. 89–95 (in Russian).

6. Efremenko E.N., Lyagin I.V., Gudkov D.A., Sirotkina M.S., Zavyalova N.V., Varfolameev S.D., Kholstov V.I. Immobilized biocatalysts on the basis of organophosphorous in the process of decomposition of organophosphorus toxic substances // *Teoreticheskaya i prikladnaya ekologiya*. 2011. No. 4. P. 26–31 (in Russian).

7. De Frank J.J., Cheng Tu-Chen, Rolakowsky G.E., Harvey S. Advances in the biodegradation of chemical warfare agents and related materials // *Abstr. Keystone symp. Environ. Biotechnol. Lake Tahoe, Calif. Biochem.* 1995. 21 a. P. 41.

8. Zavyalova N.V., Filimonov I.V., Efremenko E.N., Kholstov V.I., Yankovskaya A.A. Biocatalysts based on bacteria-destructors and enzymes of differ from high destructive capability chemical warfare agents and their degradation products in process of purification of soils and water // *Teoreticheskaya i prikladnaya ekologiya*. 2014. No. 4. P. 42–50 (in Russian).

9. Zavyalova N.V., Filimonov I.V., Efremenko E.N., Kholstov V.I., Yankovskaya A.A. Biotechnological methods and neutralizing agents for purification of soils and water, which were contaminated by ecotoxic substances //

*Teoreticheskaya i prikladnaya ekologiya*. 2014. No. 4. P. 25–32 (in Russian).

10. Efremenko E.N., Lyagin I.V., Gudkov D.A., Stepanov N.A., Sen'ko O.V., Maslova O.V., Kovalev D.A., Zavyalova N.V., Kholstov V.I., Yankovskaya A.A. Combined application of enzymatic and bacterial biocatalysts in the processes of biodegradation of organophosphorous chemical warfare agents and products of their destruction // *Teoreticheskaya i prikladnaya ekologiya*. 2015. No. 3. P. 35–39 (in Russian).

11. Funk S.B., Roberts D.J., Crawford D.J. et al. Initial phase optimization for bioremediation of munitions compound-contaminated soils // *Appl. Env. Microb.* 1992. V. 59. No.7. P. 2171–2177.

12. Kaake R.H., Roberts D.J., Stevens T.O. et al. Bioremediation of soils contaminated with the herbicide 2-secbuty1-4, 6-dinitrophenol (dinoseb) // *Appl. Env. Microb.* 1990. V. 56. No. 6. P. 1666–1671.

13. Howard J., Fox S. Review of current research projects and innovations in remediation // *Gen. Eng. News*. 1994. V. 14. No. 17. P. 8–9.

14. Smith J.D. Metabolism of phosphonates // *The role of phosphonates in living systems*. CRC Press, Boca Raton. 1983. P. 31–54.

15. Small M.J. Compounds formed from the chemical decontamination of HD, GB, and VX and their environmental fate // *Tech Rpt 8304; AD A149515*. Fort Detrick, MD: U.S. Army Medical Bioengineering Research and Development Laboratory, 1984.

16. Shames S.L., Wackett L.P., LaBarge M.S., Kuczowski R.L., Walsh C.T. Fragmentative and stereochemical isomerisation probes for homolytic carbon to phosphorus bond scission catalysed by bacterial carbon-phosphorus lyase // *Bioorg. Chem.* 1987. V. 15. P. 366–373.

17. Zavyalova N.V., Filimonov I.V., Kovtun V.A., Golipad A.N., Petrov S.V., Styazhkin K.K., Efremenko E.N., Kholstov V.I., Yankovskaya A.A. The main technological operations and stages of bioremediation of soils and water purification *in situ* // *Teoreticheskaya i prikladnaya ekologiya*. 2014. No. 4. P. 33–40 (in Russian).

18. Lejeune K.E., Russell A.J. Biocatalytic nerve agent detoxification in firefighting foams // *Biotechnol. Bioeng.* 1999. V. 62 (6). P. 659–665.

19. Efremenko E.N., Sergeeva V.S. Organophosphate hydrolase – an enzyme catalyzing degradation of phosphorus-containing toxins and pesticides // *Russian Chemical Bulletin*. 2001. V. 50. No 10. P. 1826–1832.

20. Efremenko E.N., Lyagin I.V., Zavyalov V. V., Varfolameev S.D., Zavyalova N.V., Kholstov V.I. Enzymes in the technology of destruction of organophosphorus toxic substances // *Rossiyskiy khimicheskiy zhurnal*. 2007. No. 51 (2). P. 24–29 (in Russian).

## Функциональное разнообразие стрептомицетов в почвах лесных и луговых фитоценозов техногенных территорий

© 2017. И. Г. Широких<sup>1,2</sup>, д. б. н., профессор, в. н. с.,  
 Е. В. Товстик<sup>2</sup>, к. б. н., доцент,  
 А. А. Широких<sup>2</sup>, д. б. н., профессор,  
 Т. Я. Ашихмина<sup>1,2</sup>, д. т. н., профессор, зав. лабораторией, зав. кафедрой,  
<sup>1</sup>Институт биологии Коми НЦ УрО РАН,  
 167982, Россия, Республика Коми, г. Сыктывкар, ул. Коммунистическая, 28,  
<sup>2</sup>Вятский государственный университет,  
 610000, Россия, г. Киров, ул. Московская, 36  
 e-mail: irgenal@mail.ru

Рассмотрено функциональное разнообразие стрептомицетов в почвах фитоценозов, расположенных на разном расстоянии от объекта хранения и уничтожения химического оружия «Марадыковский». При микробиологических исследованиях образцов почв разной локализации: А) в 5 км зоне от объекта, Б) в зоне, удалённой от объекта более чем на 17 км, было изолировано в чистую культуру более 100 штаммов из рода *Streptomyces*. Случайным образом составленные выборки культур равного объёма (по 10–15 изолятов из локалитетов А и Б) сравнивали по параметрам антагонистической активности к грибам рода *Fusarium*, резистентности к антибиотикам, продукции целлюлаз. Выявлены количественные и качественные различия между выборками стрептомицетов из разных локалитетов. Показано, что фенотипы изолятов одного вида из почв, удалённых от объекта на различное расстояние, могут значительно различаться между собой по функциональной активности.

Выявленные различия между комплексами стрептомицетов из разных локалитетов могут быть следствием спонтанного отбора штаммов, наиболее приспособленных к местным условиям среды. Изменения функциональной структуры комплекса почвенных стрептомицетов из локалитета А по сравнению с локалитетом Б могут быть обусловлены воздействием объекта по уничтожению химического оружия.

**Ключевые слова:** уничтожение химического оружия, почвы, стрептомицеты, антагонистическая активность, антибиотики, целлюлозолитики, резистентность к антибиотикам.

## Functional diversity of streptomycetes in soils of forest and meadow phytocenoses of technogenic territories

I. G. Shirokikh<sup>1,2</sup>, E. V. Tovstik<sup>2</sup>, A. A. Shirokikh<sup>2</sup>, T. Ya. Ashikhmina<sup>1,2</sup>,  
<sup>1</sup>Institute of Biology of the Komi Science Centre of the Ural Division RAS,  
 28 Kommunisticheskaya St., Syktyvkar, Komi Republic, Russia, 167982,  
<sup>2</sup>Vyatka State University,  
 36 Moskovskaya St., Kirov, Russia, 610000,  
 e-mail: irgenal@mail.ru

When chemical weapons destruction plants work even in normal mode there is a risk of negative impact on the environment. In biodiagnosics of undesirable consequences for soil the special role is played by Streptomycetes. As producers of antibiotics, soil Streptomycetes represent an important natural reservoir of antibiotic resistance genes. Due to their hydrolytic activity Streptomyces are able to be used as a trophic source of a wide variety of natural polymers, including cellulose, chitin, lignin, and keratin. Thus, they contribute significantly to the Cycling of chemical elements in the environment. For their biosynthetic potential Streptomycetes are nominated for the role of natural regulators of microbial communities and are important in maintaining homeostasis of the soil.

The samples of soils are collected at a different distance from the chemical weapons storage and destruction plant “Maradykovsky”. The microbiological analysis of soil samples in different locations was carried out: A) in the area of 5 km from the object, B) in the zone of more than 17 km from the object. Over 100 strains of the genera Streptomyces were isolated in pure culture. Functional diversity of streptomycetes in soils of forest and meadow phytocenoses was studied. Randomly drawn samples of cultures equal in volume (10–15 isolates from locations A and B) were compared in the following parameters: antagonistic activity to fungi of the genera Fusarium, re-

sistance to antibiotics, and production of cellulase. Quantitative and qualitative differences between the samples of streptomycetes from different locations were shown. It is shown that the phenotypes of isolates of one species grown in soils, located at a different distance from the plant, may vary considerably, as for their functional activity.

Differences between streptomycete complexes from different locations were shown. They may be caused by spontaneous selection of strains adapted to local environmental conditions. The impact of the chemical weapons destruction plant can influence the functional structure of the complex of soil streptomycetes from the location A, as compared with the location B.

**Keywords:** chemical weapons destruction, soil, *Streptomyces*, antagonistic activity, antibiotics, cellulosolytic, antibiotic resistance.

В связи с реализацией программ по уничтожению химического оружия (УХО) обострилась проблема возможного поступления отравляющих веществ и продуктов их деградации в окружающую среду. Объекты, организованные для реализации процесса УХО, относят к числу объектов повышенной техногенной опасности для природных комплексов и экосистем. При штатном функционировании таких объектов возможность прямого загрязнения почвы исключена, но остаётся возможность опосредованного загрязнения почвы за счёт осадения токсичных веществ из воздуха. Этим обусловлена актуальность своевременного выявления возможных негативных последствий деятельности объекта УХО для экологического состояния природных комплексов в целом и отдельных составляющих их компонентов.

Неотъемлемым компонентом почвенного микробного сообщества являются актиномицеты – грамположительные, спорообразующие, аэробные мицелиальные бактерии. Род *Streptomyces* является самым крупным родом в классе актинобактерий и широко известен благодаря большому количеству видов – продуцентов разнообразных антибиотиков. Согласно имеющимся оценкам 5–10% генома этих мицелиальных бактерий связано с путями биосинтеза антибиотиков [1, 2].

Многие виды стрептомицетов, начиная с середины прошлого века, нашли применение в промышленном производстве антибиотиков. Подсчитано, что стрептомицеты продуцируют 90% из почти 3000 новых видов антибиотиков, открытых за период с 1943 г. [3].

Сегодня виды рода *Streptomyces* широко используются в коммерческих проектах, связанных с геной инженерией, в качестве экспрессионных систем при получении в терапевтических целях рекомбинантных человеческих белков. В отличие от широко используемой с этой целью *Escherichia coli*, в клетках стрептомицетов происходит корректная упаковка биоактивных белков, которые затем секретируются в окружающую среду [4, 5].

Биосинтетический потенциал стрептомицетов вызывает большой интерес также в связи с возможностью его использования для борьбы с вредителями сельскохозяйственных культур: в качестве инсектицидов и акарицидов, а также нематоцидных препаратов [6, 7].

Кроме того, почвенные стрептомицеты представляют собой важный природный резервуар генов антибиотикорезистентности и могут нести детерминанты устойчивости к клинически значимым антибиотикам даже в отсутствие антропогенного загрязнения среды [8, 9].

Наконец, благодаря выраженной экзогенной активности стрептомицеты способны использовать в качестве источника углерода в своем питании множество разнообразных природных полимеров, включая целлюлозу, хитин, лигнин, кератин [10, 11], внося, таким образом, значительный вклад в круговорот химических элементов в окружающей среде. За свой необычайно широкий биосинтетический потенциал стрептомицеты были выдвинуты на роль природных регуляторов микробных сообществ и имеют важное значение в поддержании гомеостаза почвы [12].

В наших предыдущих исследованиях дерново-подзолистых почв вблизи объекта по уничтожению химического оружия показано, что представители рода *Streptomyces* доминировали в родовой структуре актиномицетных комплексов [13, 14]. В начальный период работы объекта (2006–2007 гг.) существенных различий в видовой структуре стрептомицетов между почвенными комплексами в пределах 5 км зоны от объекта и за пределами 17 км зоны от объекта УХО не обнаружено. Сходный таксономический состав в почвах лесных и луговых фитоценозов включал представителей секций и серий *Cinereus Achromogenes*, *Albus Albus* и секции *Imperfectus*. С меньшей частотой встречались виды, принадлежащие к секции *Cinereus* сериям *Chromogenes*, *Aureus*, *Violaceus*, секции *Albus* серии *Albocoloratus*, секциям *Roseus* и *Helvolo-Flavus*. Индекс Шеннона (H), отражающий видовое разнообразие стрептомицетов, изменялся внутри

выборки почв луговых фитоценозов от  $0,53 \pm 0,16$  до  $2,02 \pm 0,05$  бит/г, в ряду почв лесных фитоценозов – от  $0,80 \pm 0,47$  до  $2,33 \pm 0,18$  бит/г.

В наблюдениях 2012–2013 гг. было отмечено увеличение видового разнообразия стрептомицетов, особенно значительное в почвах, прилегающих к объекту. Так, в отобранной в 1,15 км от объекта почве лугового фитоценоза разнообразие видов стрептомицетов возросло в 12 раз, с  $H=0,16 \pm 0,36$  в 2007 г. до  $H=1,98 \pm 0,29$  бит/г в 2012 г. Кроме существенного расширения видового разнообразия, за период работы объекта в режиме уничтожения химоружия, в почвах, отобранных в пределах 5 км зоны от объекта, отмечено увеличение на порядок численности стрептомицетов и их доли в общем прокариотном комплексе. В более удалённых от объекта почвах, изменения в структуре комплексов стрептомицетов были менее значительными. Это объясняется тем, что работа объекта «Марадыковский» исключила ранее существовавшую возможность самопроизвольной утечки загрязняющих веществ, и локально изменившиеся условия среды в непосредственной близости от объекта стали более благоприятными для развития стрептомицетов.

Наряду с изменениями в численности и таксономическом разнообразии стрептомицетов, под влиянием техногенного загрязнения почвы могут происходить изменения в физиологии их отдельных представителей и функционального разнообразия стрептомицетного комплекса в целом. Однако работы по изменчивости микробных сообществ в результате антропогенной деятельности ограничиваются, как правило, особенно с развитием генно-молекулярных методов и введением в практику метагеномного секвенирования, изучением таксономического состава, и оставляют вне поля зрения возможные нарушения функциональной структуры почвенных микробных комплексов.

Цель нашей работы заключалась в оценке функциональной активности природных изолятов стрептомицетов из почв, подверженных влиянию объекта УХО, для выявления возможных нарушений структуры и изменения функционального разнообразия почвенных микробных сообществ.

### Объекты и методы

Объектами исследования служили природные изоляты стрептомицетов из почв, отобранных на площадках системы государствен-

ного экологического мониторинга (ГЭМ) в санитарно-защитной зоне (СЗЗ) ОХУХО «Марадыковский». Выделение штаммов в чистую культуру проводили из посевов разведений почвенных суспензий на казеин-глицериновый агар. Использовали для посева образцы почв разной локализации, отобранные: А) в 5 км зоне от объекта, Б) в зоне, удалённой от объекта более чем на 17 км. Для селективного ограничения роста немиецелиальных бактерий и грибов почву предварительно прогревали при  $70^\circ\text{C}$  в течение 4 час и в среду дополнительно вводили 50 мкг/мл нистатина. Чашки с посевами инкубировали в термостате при  $27^\circ\text{C}$  в течение 10–12 сут и при комнатной температуре до 3-х недель. О принадлежности вырастающих колоний к роду *Streptomyces* судили по следующим морфологическим признакам: нефрагментированный мицелий, длинные цепочки спор – на воздушном и отсутствие спор – на субстратном мицелии [15], отмечаемым при микроскопии (Leica DM 2500, Германия) на чашках. Отсев колоний производили на овсяный агар с последующей очисткой культур в течение 2–3 пассажей. Видовую идентификацию стрептомицетов осуществляли в соответствии с ключом Гаузе [16].

При изучении биосинтетического потенциала выделенных культур определяли наличие/отсутствие у стрептомицетов целлюлаз, путем визуальной оценки изменения субстрата (фильтровальной бумаги). Оценку вели по пятибалльной шкале Билай [17]. Далее целлюлозолитическую активность определяли на среде Гетчинсона с карбоксиметилцеллюлозой (КМЦ) [18]. Поверхность среды с выросшими колониями стрептомицетов заливали 0,1% водным раствором Конго красного, после 15 мин экспозиции краситель сливали и добавляли на поверхность 1М раствор NaCl, экспонируя чашки еще в течение 10 мин. Поскольку продукты деструкции целлюлозы не окрашиваются красителем, о целлюлозолитической активности судили по величине прозрачной зоны около тестируемого микроорганизма.

Антагонистическую активность стрептомицетов исследовали методом агаровых блочков [19]. В качестве тест-культур использовали штаммы фитопатогенных микромицетов *Fusarium oxysporum* И-1, *F. culmorum* Т8, *F. avenaceum* 7/2, выращенные на среде Чапека.

Чувствительность изолятов к антибиотикам определяли, используя стандартные бумажные диски с антибиотиками (ДИ-ПЛС-50-01, НИЦФ, С.-Пб.) из разных групп и классов, в клинически значимых концентрациях. Группа

аминогликозидов была представлена канамицином, 30 мкг (КАН) и гентамицином, 120 мкг (ГЕН); группа тетрациклинов – тетрациклином, 30 мкг (ТЕТ) (класс поликетиды); группа макролидов – рифампицином, 5 мкг (РИФ) (класс анзамицины) и эритромицином, 15 мкг (ЭРИ); группа бета-лактамов – амоксициллином, 20 мкг (АМК).

По каждому параметру функциональной активности сравнивали случайным образом составленные выборки культур из локалитетов А и Б равного объёма (по 10-15 изолятов). Статистическую обработку данных проводили стандартными методами [20] с использованием программ STATGRAFICS и EXEL 5.

**Результаты и обсуждение**

С целью выявления возможных нарушений функциональной деятельности стрептомицетов под влиянием объекта УХО оценивали их целлюлозолитическую и антагонистическую активность, определяли чувствительность выделенных культур к антибиотикам. При этом сравнивали две равные по объёму выборки стрептомицетных изолятов из почв, удалённых от объекта на разное расстояние.

При выращивании стрептомицетов из локалитетов А и Б на целлюлозе в качестве единственного источника углерода оценка их роста по пятибалльной шкале Билай не превышала двух баллов (+, ++) для обеих сравниваемых выборок (табл. 1). Различий между выборками культур из разных локалитетов по величине зон разрушения КМЦ в тесте с Конго красным также не выявлено. Средний размер зоны (13,3±9,2 мм) для культур из почв ближнего локалитета А, несущественно отли-

чался от аналогичного показателя (11,6±9,4 мм) для культур из дальнего локалитета Б. В то же время доля культур с целлюлозной активностью в выборке из ближнего почвенного локалитета А была на 22% больше, чем в выборке стрептомицетов из локалитета Б. Полученные результаты показывают, что воздействие на почву объекта УХО не оказало значимого влияния на бактерии, участвующие в разложении целлюлозы в почве.

Оценка антагонистической активности стрептомицетных изолятов в отношении известных своей вредоносностью грибов рода *Fusarium* показала следующее. Изоляты из ближнего к объекту локалитета А значительно уступали по ингибированию роста фитопатогенов изолятам, выделенным из почв дальнего локалитета Б, где вероятность загрязнения почвы продуктами деструкции ХО значительно меньше. Доля антифунгально активных культур в выборках из почв, примыкающих к объекту, варьировала от 23 до 46%, тогда как в почвах, удалённых от объекта более чем на 17 км, изменялась в узких пределах 62–67% в зависимости от тест-культуры гриба (табл. 2). Средний диаметр зон угнетения грибов *Fusarium oxysporum* И-1, *F. culmorum* Т8, *F. avenaceum* 7/2 (7,9; 5,8; 10 мм соответственно) стрептомицетами из локалитета А существенно уступал зонам, образуемым изолятами из локалитета Б (в среднем 15,4; 14,6; 18,6 мм соответственно). Наибольшей активностью в подавлении роста грибных культур отличались виды *S. hygroscopicus* и *S. wedmorensis*, однако отдельные штаммы этих видов различались между собой, в зависимости от места их изоляции. Эти данные показывают, что антифунгальный потенциал стрептомицетов из

**Таблица 1**  
Целлюлозолитическая активность изолятов из почв, различно удалённых от объекта УХО

Изоляты локалитета А	Рост по шкале Билай	Зона разрушения КМЦ, мм	Изоляты локалитета Б	Рост по шкале Билай	Зона разрушения КМЦ, мм
<i>Streptomyces</i> sp. 60.7.12	±	0	<i>S. hygroscopicus</i> 140.13	++	18
<i>Streptomyces</i> sp. 62.3	++	28	<i>S. pseudogriseolus</i> 140.9	++	24
<i>Streptomyces</i> sp. 43.10.7	+	15	<i>S. pseudogriseolus</i> 140.2	+	15
<i>Streptomyces</i> sp. 43.14.7	+	0	<i>S. antimycoticus</i> 140.1	++	20
<i>S. wedmorensis</i> 38.11	++	15	<i>Streptomyces</i> sp. 140.5	++	10
<i>Streptomyces</i> sp. 17.11.8	++	20	<i>S. chromofuscus</i> 140.6	++	17
<i>Streptomyces</i> sp. 3.4.12	+	10	<i>S. endus</i> 135.5	+	0
<i>Streptomyces</i> sp. 43.10.12	++	20	<i>S. hygroscopicus</i> 135.8	+	0
<i>Streptomyces</i> sp. 17.5.12	+	12	<i>S. mitakiensis</i> 135.13	+	0
Среднее		13,3±9,2	Среднее		11,6±9,4
Доля целлюлозолитиков, %		78	Доля целлюлозолитиков, %		66

Таблица 2

Зоны ингибирования роста грибов рода *Fusarium* культурами стрептомицетов, выделенными из почв различного удаления от объекта УХО

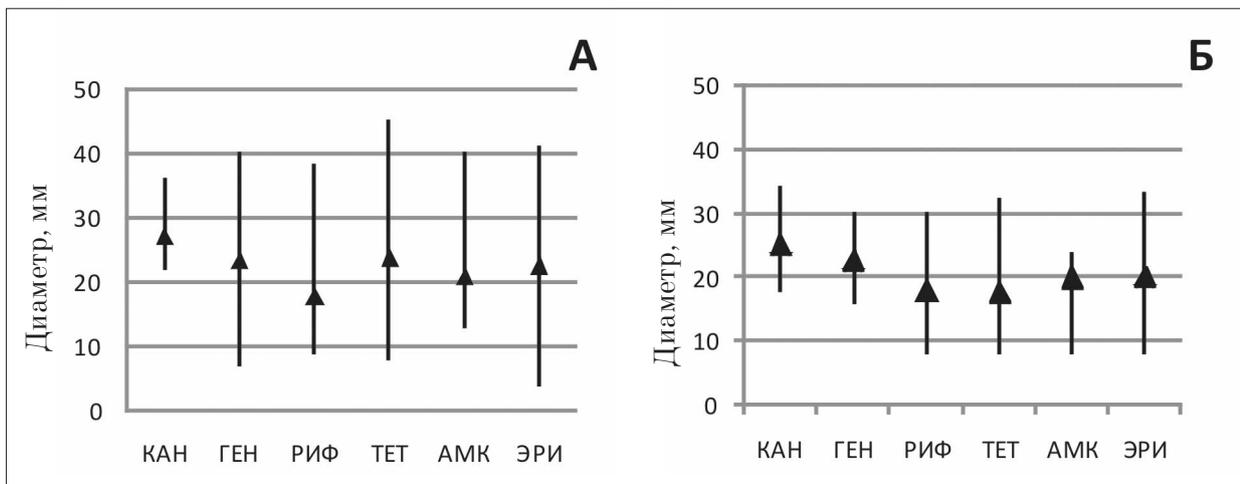
Изоляты локалитета А				Изоляты локалитета Б			
	1	2	3		1	2	3
<i>Streptomyces</i> sp. 38.3	0	0	0	<i>S. wedmorensis</i> 135.2	0	0	0
<i>S. gelaticus</i> 38.7	0	0	0	<i>S. hygrosopicus</i> 135.3	20	20	36
<i>S. wedmorensis</i> 38.11	30	29	27	<i>S. xantocidicus</i> 135.4	0	0	26
<i>S. globisporus</i> 38.12	0	0	0	<i>S. endus</i> 135.5	14	20	23
<i>Streptomyces</i> sp. 43.2.7	13	26	19	<i>S. hygrosopicus</i> 135.8	–	19	26
<i>S. speleomycini</i> 75.2	17	0	25	<i>S. arenae</i> 140-12	0	0	16
<i>Streptomyces</i> sp. 75.3	–	0	0	<i>S. hygrosopicus</i> 140-13	26	23	–
<i>S. aureofaciens</i> 75.4	0	0	16	<i>S. hygrosopicus</i> 140-10	28	30	0
<i>S. noursei</i> 75.5	0	0	0	<i>S. chromofuscus</i> 140-6	0	0	18
<i>Streptomyces</i> sp. 75.6	0	0	0	<i>S. antimycoticus</i> 140-1	25	26	47
<i>S. hygrosopicus</i> 75.7	19	20	25	<i>S. pseudogriseolus</i> 140-2	27	22	0
<i>S. aburaviensis</i> 75.10	0	0	0	<i>S. zaomycticus</i> 140-9	29	30	31
<i>S. althioticus</i> 75.12	16	0	18	<i>S. globisporus</i> 141-6	16	0	0
Среднее	7,9	5,8	10,0		15,4	14,6	18,6
Частота встречаемости антагонистов, %	42	23	46		67	62	67

Примечание: 1 – *Fusarium oxysporum* И-1, 2 – *F. culmorum* Т8, 3 – *F. avenaceum* 7/2.

Таблица 3

Зоны ингибирования антибиотиками роста стрептомицетов, мм

Штаммы	КАН	ГЕН	РИФ	ТЕТ	АМК	ЭРИ
изоляты из локалитета А						
<i>S. gelaticus</i> 38.7	22	7	0	0	17	4
<i>S. wedmorensis</i> 38.11	36	40	16	12	40	20
<i>S. globisporus</i> 38.12	25	24	10	34	22	0
<i>Streptomyces</i> sp. 43.2.7	30	20	14	16	14	18
<i>S. speleomycini</i> 75.2	35	28	38	42	22	24
<i>Streptomyces</i> sp. 75.3	22	18	0	24	18	0
<i>S. noursei</i> 75.5	26	24	11	8	27	19
<i>Streptomyces</i> sp. 75.6	0	22	0	0	0	22
<i>S. hygrosopicus</i> 75.7	25	25	10	19	0	32
<i>S. aburaviensis</i> 75.10	24	25	9	14	15	41
<i>S. althioticus</i> 75.12	24	23	21	45	13	0
изоляты из локалитета Б						
	КАН	ГЕН	РИФ	ТЕТ	АМК	ЭРИ
<i>S. wedmorensis</i> 135.2	18	19	28	18	8	10
<i>S. hygrosopicus</i> 135.3	20	18	17	8	0	8
<i>S. xantocidicus</i> 135.4	28	26	14	13	22	28
<i>S. endus</i> 135.5	28	16	8	10	0	0
<i>S. hygrosopicus</i> 135.8	24	22	11	12	15	14
<i>Streptomyces</i> sp. 135.1	24	24	30	32	24	20
<i>Streptomyces</i> sp. 140.13	28	30	0	14	12	30
<i>Streptomyces</i> sp. 140.10	30	24	0	25	0	33
<i>Streptomyces</i> sp. 140.1	23	18	0	15	22	20
<i>Streptomyces</i> sp. 140.9	34	28	10	24	14	32
<i>Streptomyces</i> sp. 141.15	19	25	24	23	12	10



**Рис.** Средняя по выборкам чувствительность к различным антибиотикам культур стрептомицетов, выделенных из почв локалитетов, удалённых от объекта УХО на расстояние менее 5 км (А) и более 17 км (Б)

ближнего к объекту локалитета А ниже, чем у стрептомицетов из дальнего локалитета Б.

Определение устойчивости стрептомицетных изолятов к антибиотикам, среди которых имелись ингибиторы синтеза клеточной стенки (АМК), блокаторы синтеза белка на уровне трансляции (ТЕТ и ЭРИ) и на уровне мРНК (аминогликозиды) не выявило между сравниваемыми выборками значительных различий (табл. 3). Устойчивостью ко всем испытанным антибиотикам среди изолятов не обладал ни один штамм. Доля устойчивых хотя бы к одному антибиотику штаммов в выборках из локалитетов А и Б составила 54 и 45% соответственно. В ближнем к объекту локалитете А выявлен штамм со множественной резистентностью к антибиотикам КАН, РИФ, ТЕТ и АМК одновременно. В выборке изолятов из почвы удалённого от объекта локалитета Б культур с устойчивостью более чем к двум антибиотикам одновременно не обнаружено. Доля стрептомицетов с отсутствием устойчивости ко всем шести испытанным антибиотикам в той и другой выборке была одинаковой и составила 45%. Средняя по выборке чувствительность штаммов к антибиотикам для локалитета А увеличивалась в ряду: РИФ ≤ ЭРИ ≤ АМК ≤ ТЕТ ≤ КАН ≤ ГЕН, а для локалитета Б в порядке: АМК ≤ РИФ ≤ ТЕТ ≤ ЭРИ ≤ ГЕН ≤ КАН (рис.).

### Заключение

Таким образом, оценка функциональной активности природных изолятов стрептомицетов из почв, подверженных влиянию объекта УХО, показала, что значительных изменений в

целлюлозолитической активности мицелиальных прокариот за время деятельности объекта в производственном режиме не произошло. Об этом свидетельствуют результаты проверки природных изолятов из почв, локализованных в пределах 5 км зоны вокруг объекта и за пределами 17 км зоны вокруг него. Вместе с тем оценка противомикробной активности культур стрептомицетов позволила выявить имеющиеся отклонения в функциональной структуре почвенных микробных комплексов. Так, в почвах ближнего к объекту локалитета стрептомицеты с антагонистической активностью к фитопатогенным грибам встречались значительно реже, чем в почвах, удалённых от объекта на расстояние, не менее 17 км, где вероятность их загрязнения продуктами деструкции ХО, минимальная. Угнетение антифунгальной активности почвенных стрептомицетов под влиянием объекта УХО сопровождалось также изменением вклада мицелиальных прокариот в антибиотический резистом почв ближнего локалитета по сравнению с удалёнными от объекта почвами. Наметилась явная тенденция к увеличению частоты встречаемости устойчивых одновременно к нескольким антибиотикам штаммов в почвах, примыкающих к объекту. При этом значительных изменений в спектре антибиотической чувствительности культур стрептомицетов не выявлено. Природные изоляты из обоих локалитетов характеризовались чувствительностью, в первую очередь к антибиотикам аминогликозидной группы, и были относительно устойчивы к представителям групп макролидов и β-лактамов. Выявленные изменения в продукции почвенными стреп-

томицетами антибиотиков и тенденция к повышению резистентности к ним у природных изолятов из ближнего к объекту локалитета может служить основанием к проведению более углублённых исследований, направленных на выяснение влияния продуктов деструкции ХО на вторичный метаболизм мицелиальных прокариот.

*Выполнено в рамках государственного задания Вятского государственного университета по теме «Механизмы адаптации и устойчивости почвенной микробиоты к техногенному загрязнению» № 5. 4962.2017/БЧ.*

### Литература

1. Omura S., Ikeda H., Ishikawa J., Hanamoto A., Takahashi C., Shinose M., Kikuchi H. Genome sequence of an industrial microorganism *Streptomyces avermitilis*: deducing the ability of producing secondary metabolites // Proceedings of the National Academy of Sciences. 2001. V. 98. No. 21. P. 12215–12220.
2. Bentley S.D., Chater K.F., Cerdano-Tarraga A.M., Challis G.L., Thomson N.R., James K.D., Bateman A. Complete genome sequence of the model actinomycete *Streptomyces coelicolor* A3 (2) // Nature. 2002. V. 417. No. 6885. P. 141–147.
3. Watve M.G., Tickoo R., Jog M.M., Bhole B.D. How many antibiotics are produced by the genus *Streptomyces*? // Arch. Microbiol. 2001. V. 176. P. 386–390.
4. Binnie C., Cossar J.D., Stewart D.I.H. Heterologous biopharmaceutical protein expression in *Streptomyces* // Trends in biotechnology. 1997. V. 15. No. 8. P. 315–320.
5. Schaerlaekens K., Lammertyn E., Geukens N., De Keersmaeker S., Anné J., Van Mellaert L. Comparison of the Sec and Tat secretion pathways for heterologous protein production by *Streptomyces lividans* // Journal of biotechnology. 2004. V. 112. No. 3. P. 279–288.
6. Kaur T., Vasudev A., Sohal S.K., Manhas R.K. Insecticidal and growth inhibitory potential of *Streptomyces hydrogenans* DH16 on major pest of India, *Spodoptera litura* (Fab.) (Lepidoptera: Noctuidae) // BMC microbiology. 2014. V. 14 (1). P. 1.
7. Kekuda T.R. P., Shobha K.S., Onkarappa R. Fascinating diversity and potent biological activities of Actinomycete metabolites // Journal of Pharmacy Research. 2010. V. 3. No. 2. P. 250–256.
8. D'Costa V.M., McGrann K.M., Hughes D.W., Wright G.D. Sampling the antibiotic resistome // Science (New York, NY). 2006. V. 311. No. 5759. P. 374–377.
9. Bhullar K., Waglechner N., Pawlowski A., Koteva K., Banks E. D., Johnston M. D., Wright G. D. Antibiotic resistance is prevalent in an isolated cave microbiome // PloS one. 2012. V. 7. No. 4. P. e34953.

10. Chater K.F., Biró S., Lee K.J., Palmer T., Schrempf H. The complex extracellular biology of *Streptomyces* // FEMS microbiology reviews. 2010. V. 34. No. 2. P. 171–198.
11. Schlatter D.C., Davelos Baines A.L., Xiao K., Kinkel L.L. Resource use of soilborne *Streptomyces* varies with location, phylogeny, and nitrogen amendment // Microbial ecology. 2013. V. 66. No. 4. P. 961–971.
12. Tarkka M., Hampp R. Secondary Metabolites of Soil Streptomycetes in Biotic Interactions // In: Karlovsky P. (Ed.). Secondary Metabolites in Soil Ecology. Soil Biology 14. Berlin – Heidelberg: Springer-Verlag. 2008. P. 107–126.
13. Ашихмина Т.Я., Товстик Е.В., Огородникова С.Ю., Домнина Е.А., Широких И.Г. Численность и разнообразие почвенных актиномицетов вблизи объекта по уничтожению химического оружия «Марадыковский» // Теоретическая и прикладная экология. 2012. № 4. С. 67–72.
14. Товстик Е.В., Огородникова С.Ю., Домнина Е.А., Широких И.Г. Динамика актиномицетных комплексов в почвах лесных фитоценозов вблизи объектов по уничтожению химического оружия «Марадыковский» // Теоретическая и прикладная экология. 2013. № 4. С. 92–99.
15. Определитель бактерий Берджи. В 2-х т./ Под ред. Дж. Хоулта, Н. Крига, П. Снита, Дж. Стейли, С.С. Уилльямса. М.: Мир, 1997. Т. 2. 800 с.
16. Гаузе Г.Ф., Преображенская Т.П., Свешникова М.А., Терехова Л.П., Максимова Т.С. Определитель актиномицетов. Роды *Streptomyces*, *Streptoverticillium*, *Chainia*. М.: Наука, 1983. 248 с.
17. Методы экспериментальной микологии. Справочник / Под ред. В.И. Билай. Киев: Наукова Думка. 1982. 550 с.
18. Libbert E., Risch H. Interactions between plants and epiphytic bacteria regarding their auxin metabolism. V. Isolation and identification of the IAA-producing and destroying bacteria from pea plants // Physiol. Plantarum. 1969. V. 22. P. 51–58.
19. Егоров Н.С. Основы учения об антибиотиках. М.: Высшая школа. 1979. 485 с.
20. Лакин Г.Ф. Биометрия. М.: Высшая школа. 1990. 352 с.

### References

1. Omura S., Ikeda H., Ishikawa J., Hanamoto A., Takahashi C., Shinose M., Kikuchi H. Genome sequence of an industrial microorganism *Streptomyces avermitilis*: deducing the ability of producing secondary metabolites // Proceedings of the National Academy of Sciences. 2001. V. 98. No. 21. P. 12215–12220.
2. Bentley S.D., Chater K.F., Cerdano-Tarraga A.M., Challis G.L., Thomson N.R., James K.D., Bateman A. Complete genome sequence of the model actinomycete *Streptomyces coelicolor* A3 (2) // Nature. 2002. V. 417. No. 6885. P. 141–147.

3. Watve M.G., Tickoo R., Jog M.M., Bhole B.D. How many antibiotics are produced by the genus *Streptomyces*? // Arch. Microbiol. 2004. V. 176. P. 386–390.
4. Binnie C., Cossar J.D., Stewart D.I.H. Heterologous biopharmaceutical protein expression in *Streptomyces* // Trends in biotechnology. 1997. V. 15. No. 8. P. 315–320.
5. Schaerlaekens K., Lammertyn E., Geukens N., De Keersmaecker S., Anné J., Van Mellaert L. Comparison of the Sec and Tat secretion pathways for heterologous protein production by *Streptomyces lividans* // Journal of biotechnology. 2004. V. 112. No. 3. P. 279–288.
6. Kaur T., Vasudev A., Sohal S.K., Manhas R.K. Insecticidal and growth inhibitory potential of *Streptomyces hydrogenans* DH16 on major pest of India, *Spodoptera litura* (Fab.) (Lepidoptera: Noctuidae) // BMC microbiology. 2014. V. 14 (1). P. 1.
7. Kekuda T.R. P., Shobha K.S., Onkarappa R. Fascinating diversity and potent biological activities of Actinomycete metabolites // Journal of Pharmacy Research. 2010. V. 3. No. 2. P. 250–256.
8. D'Costa V.M., McGrann K.M., Hughes D.W., Wright G.D. Sampling the antibiotic resistome // Science (New York, NY). 2006. V. 311. No. 5759. P. 374–377.
9. Bhullar K., Waglechner N., Pawlowski A., Koteva K., Banks E. D., Johnston M. D., Wright G. D. Antibiotic resistance is prevalent in an isolated cave microbiome // PloS one. 2012. V. 7. No. 4. P. e34953.
10. Chater K.F., Biró S., Lee K.J., Palmer T., Schrempf H. The complex extracellular biology of *Streptomyces* // FEMS microbiology reviews. 2010. V. 34. No. 2. P. 171–198.
11. Schlatter D.C., Davelos Baines A.L., Xiao K., Kinkel L.L. Resource use of soilborne *Streptomyces* varies with location, phylogeny, and nitrogen amendment // Microbial ecology. 2013. V. 66. No. 4. P. 961–971.
12. Tarkka M., Hampp R. Secondary Metabolites of Soil Streptomycetes in Biotic Interactions // In: Karlovsky P. (Ed.). Secondary Metabolites in Soil Ecology. Soil Biology 14. Berlin – Heidelberg: Springer-Verlag. 2008. P. 107–126.
13. Ashikhmina T.Ya., Tovstik E.V., Ogorodnikova S.Yu., Domnina E.A., Shirokikh I.G. The abundance and diversity of soil actinomycetes in close proximity to the chemical weapons destruction plant “Maradykovsky” // Teoreticheskaya i prikladnaya ekologiya. 2012. No. 4. P. 67–72 (in Russian).
14. Tovstik E.V., Ogorodnikova S.Yu., Domnina E.A., Shirokikh I.G. The Dynamics actinomycetic complexes in soils of forest phytocenoses near the chemical weapons destruction plant “Maradykovsky” // Teoreticheskaya i prikladnaya ekologiya. 2013. No. 4. P. 92–99 (in Russian).
15. The determinant of bacteria, Bergi. 2 t. / Eds. Dzh. Khoul, N. Krig, P. Snit, Dzh. Steyli, S.S. Uillyams. Moskva: Mir, 1997. V. 2. 800 p. (in Russian).
16. Gauze G.F., Preobrazhenskaya T.P., Sveshnikova M.A., Terekhova L.P., Maksimova T.S. The determinant of actinomycetes. The geni Sreptomyces, Streptoverticillium, Chainia. Moskva: Nauka, 1983. 248 p. (in Russian).
17. Methods of experimental Mycology. Reference book / Pod red. V.I. Bilay. Kiev: Naukova dumka. 1982. 550 p. (in Russian).
18. Libbert E., Risch H. Interactions between plants and epiphytic bacteria regarding their auxin metabolism. V. Isolation and identification of the IAA-producing and destroying bacteria from pea plants // Physiol. Plantarum. 1969. V. 22. P. 51–58.
19. Egorov N.S. The basics of antibiotics. Moskva: Vysshaya shkola. 1979. 485 p. (in Russian).
20. Lakin G.F. Biometry. Moskva: Vysshaya shkola. 1990. 352 p. (in Russian).

**Структура населения наземных беспозвоночных  
луговых экосистем южной тайги**

© 2017. С. В. Пестов<sup>1,2</sup>, к. б. н., доцент, н. с.,  
Е. А. Домнина<sup>1,2</sup>, к. б. н., доцент, О. И. Кулакова<sup>1</sup>, к. б. н., н. с.,  
А. Г. Татаринов<sup>1</sup>, к. б. н., в. н. с., А. В. Мазеева<sup>2</sup> магистрант,  
<sup>1</sup>Институт биологии Коми научного центра Уральского отделения РАН,  
167982, Россия, г. Сыктывкар, ул. Коммунистическая, 28,  
<sup>2</sup>Вятский государственный университет  
610000, Россия, г. Киров, ул. Московская, 36  
e-mail: atylotus@mail.ru

Представлен анализ динамики сообществ беспозвоночных обитателей травостоя луговых экосистем. Исследования проводили в июле в период с 2010 по 2015 г. На исследованных участках зарегистрировано 419 видов беспозвоночных из 104 семейств. Общая численность беспозвоночных обитателей травостоя варьировала от  $620,4 \pm 65,6$  до  $1147 \pm 214,3$  экз./100 взмахов. Ведущими по численности отрядами являются полужесткокрылые и двукрылые, составляющие более 50% от всего комплекса обитателей травостоя (хортобионтов). Проведено сравнение таксономического состава высших сосудистых растений и хортобионтов исследованных участков луговых экосистем по индексу Чекановского-Съеренсена. Отмечено сходство объединения отдельных участков в кластеры по структуре сообществ растений и беспозвоночных. Анализ сообществ наземных беспозвоночных методом главных компонент позволяет определить удельный вес факторов, которые оказывают влияние на структуру населения беспозвоночных. Более 60% всей дисперсии определяют три первых главных компонент. Первая компонента связана с особенностями растительного сообщества (число видов растений, индекс разнообразия Шеннона и высота травостоя), она оказывает влияние на группы Hymenoptera, Diptera и Aranei. Вторая компонента характеризует особенности режима увлажнения и богатства почв и определяет обилие Orthoptera. Третья компонента включает метеорологические факторы (температура воздуха и количество осадков), она обуславливает обилие Orthoptera, Heteroptera и Homoptera.

*Ключевые слова:* хортобионты, динамика численности, экосистемы, экологические факторы.

**Structure of terrestrial invertebrates community  
of meadow ecosystems in south taiga**

© 2017. S. V. Pestov<sup>1,2</sup>, E. A. Domnina<sup>1,2</sup>, O. I. Kulakova<sup>1</sup>,  
A. G. Tatarinov<sup>1</sup>, A. V. Mazeeva<sup>2</sup>,  
<sup>1</sup>Institute of Biology of the Komi Science Centre of the Ural Division RAS,  
28 Kommunisticheskaya St., Syktyvkar, Russia, 167982,  
<sup>2</sup>Vyatka State University,  
36 Moskovskaya St., Kirov, Russia, 610000,  
e-mail: atylotus@mail.ru

The analysis of the dynamics of communities of invertebrate inhabitants of the grass stand in the meadow ecosystems in the period from 2010 to 2015 is presented. During the research period 419 species of invertebrates from 104 families were registered in the investigated areas. The total number of invertebrate inhabitants of the herbage varied from  $620.4 \pm 65.6$  to  $1147 \pm 214.3$  ind./100 sweeps. Leading largest groups are Hemiptera and Diptera, comprising over 50% of the whole complex of inhabitants of the herbage (chortobionts). Taxonomic compositions of plants and chortobionts of the investigated sites of grassland ecosystems were compared according to the index of Czekanowski-Sørensen. The similarity of association of some sites in clusters on structure of communities of vascular plants and invertebrates is noted. The analysis of terrestrial invertebrate communities by the main component method makes it possible to determine the factors that influence the structure of the invertebrate population. Over 60% of the total dispersion is determined by the first three axes of the principal components. The first component is related to the characteristics of the plant community (the number of plant species, the Shannon diversity index and the height of the grass stand), it affects the groups

Hymenoptera, Diptera and Aranei. The second component characterizes the peculiarities of the moistening regime and richness of soils and determines abundance of Orthoptera. The third component includes meteorological factors (air temperature and precipitation), it determines abundance of Orthoptera, Heteroptera and Homoptera.

**Keywords:** chortobionts, population dynamics, ecosystems, ecological factors.

Анализ влияния хозяйственной деятельности человека на окружающую среду в настоящее время приобретает всё большую актуальность. Насекомые являются обязательным и самым разнообразным компонентом всех экосистем, они играют ключевую роль в регулировании и динамике экосистем [1]. Была показана возможность оценки наземных экосистем на основе анализа таксономической и экологической структуры энтомологических комплексов [2]. Состав и соотношение групп беспозвоночных динамично изменяются в зависимости от естественных биотических, абиотических и антропогенных факторов [3–5]. Биоиндикационные исследования сообществ насекомых проводятся прежде всего для оценки воздействия землепользования [6–8] или влияния поллютантов [9–12]. Данные по фауне и структуре населения сообществ наземных беспозвоночных в зоне защитных мероприятий объекта уничтожения химического оружия носят отрывочный характер [13–14]. Весьма специфическими биотическими и абиотическими условиями обладает толща травостоя, которая создаёт очень широкий спектр экологических ниш для беспозвоночных обитателей травостоя (хортобионтов) и обуславливает значительное разнообразие их как в таксономическом, так и в адаптивном отношениях [15]. Тесная связь

обитателей травостоя с растительностью позволяет ожидать их выраженную реакцию на изменение структуры травостоя под действием различных факторов, в том числе загрязнения [16–17]. Выявление особенностей структуры и динамики наземного комплекса беспозвоночных в условиях различных фитоценозов позволяет понять основные механизмы формирования и функционирования экосистем.

Целью работы являлось выявление факторов, определяющих структуру населения беспозвоночных обитателей травостоя на участках настоящих суходольных лугов подзоны южной тайги Кировской области.

### Материал и методика

Материалы по количественному учёту обитателей травостоя собирали в течение 6 лет (2010–2015 гг.) в середине июля на шести участках комплексного экологического мониторинга в районе объекта уничтожения химического оружия (ОУХО) [18].

На каждом участке энтомологическим сачком отбирали беспозвоночных в трёхкратной повторности по 30 взмахов каждая и пересчитывали на 100 взмахов. [19]. Для более полного выявления видового состава энтомологическим сачком проводился сбор активно летающих в воздухе насекомых. Для

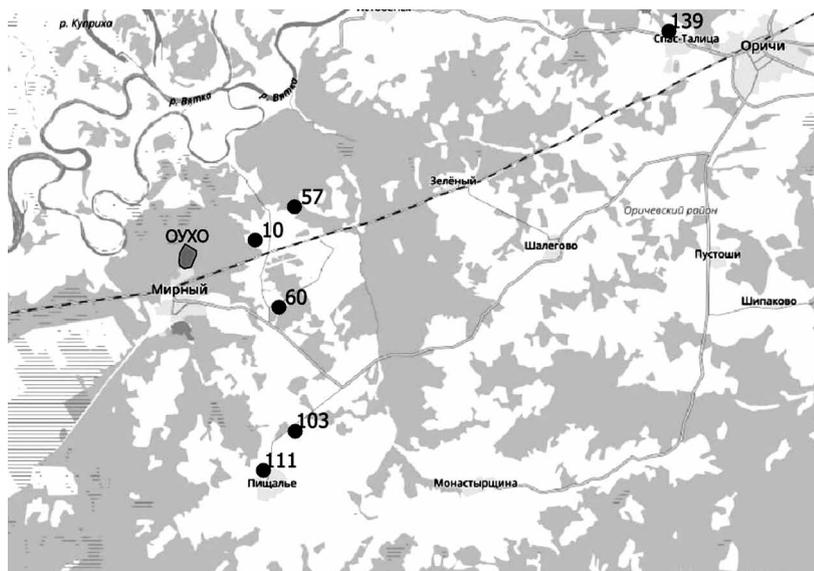


Рис. 1. Карта расположения точек пробоотбора

оценки биоразнообразия беспозвоночных использовали индексы Шеннона и Бергера-Паркера. Выявление ведущих факторов, определяющих структуру сообществ, проводили с использованием метода главных компонент. Параметры осей рассчитывались по матрице парных корреляций. Таксономический состав растений и хортобионтов исследованных участков луговых экосистем сравнивался по индексу Чекановского-Съёренсена. Для статистической обработки данных использовали программы Past 2.17 [26] и EXCELTOR [27].

Для характеристики и последующей оценки состояния растительности были применены общие геоботанические методики [20–22]. В луговых биоценозах пробные площади закладывали размером 10x10 м<sup>2</sup>. На пробных площадках подробно описаны вертикальная и горизонтальная структура фитоценозов, выявлен их флористический состав, замерена высота растений. Индекс Шеннона для рас-

тительных сообществ определили по данным о проективном покрытии видов растений. Средняя высота травостоя определяли по формуле:

$$H' = \frac{\sum h_i \cdot p_i}{\sum p_i},$$

где  $h_i$  – высота  $i$  растения,  $p_i$  – проективное покрытие  $i$  растения.

Оценку экологических условий местообитаний производили с использованием экологических шкал Л. Г. Раменского. Для расчёта экологических ступеней экологических шкал использовали компьютерную программу EcoScaleWin [23–25]. Характеристика лугов представлена в таблице 1.

Гидрометеорологические данные были взяты с сайта www.gp5.ru. Проведена выборка архивных данных за июль 2010–2015 гг. Анализ метеорологических данных показал, что максимальная температура и минимальное ко-

Таблица 1

Геоботаническая характеристика луговых сообществ

Характеристика	Номер участка					
	10	57	60	103	111	139
Число видов растений	31–42	33–59	36–57	33–45	44–53	23–47
Высота травостоя, см	97–114	72–91	70–91	71–90	69–84	40–70
Общее проективное покрытие	80–95	50–80	70–90	70–90	70–85	80–90
Шкала увлажнения (FE)	70–79	56,5–67	66–77	62,5–66	66–75,5	69–79
Шкала активного богатства и засоленности почвы (NS)	8,5–11,5	10,5–12,5	11,5–11,5	9,5–11	9–11,5	8–12
Шкала переменности увлажнения (VF)	10,0–11,0	9,0	8,0–10,0	8,0–9,0	6,5–11,0	6,5–7,5
Шкала аллювиальности (A)	2,0–5,0	2,0–4,0	2,5–4,0	2,0–4,0	2,0–5,5	2,0–2,5
Шкала пастбищной дигрессии (PD)	3,0–4,0	3,5–4,5	3,5–4,5	3,5–4,5	4,0–5,5	3,5–4,0
Индекс Шеннона растительных сообществ	1,95–2,69	2,26–3,17	2,72–3,09	1,65–2,55	2,16–2,73	2,31–2,92

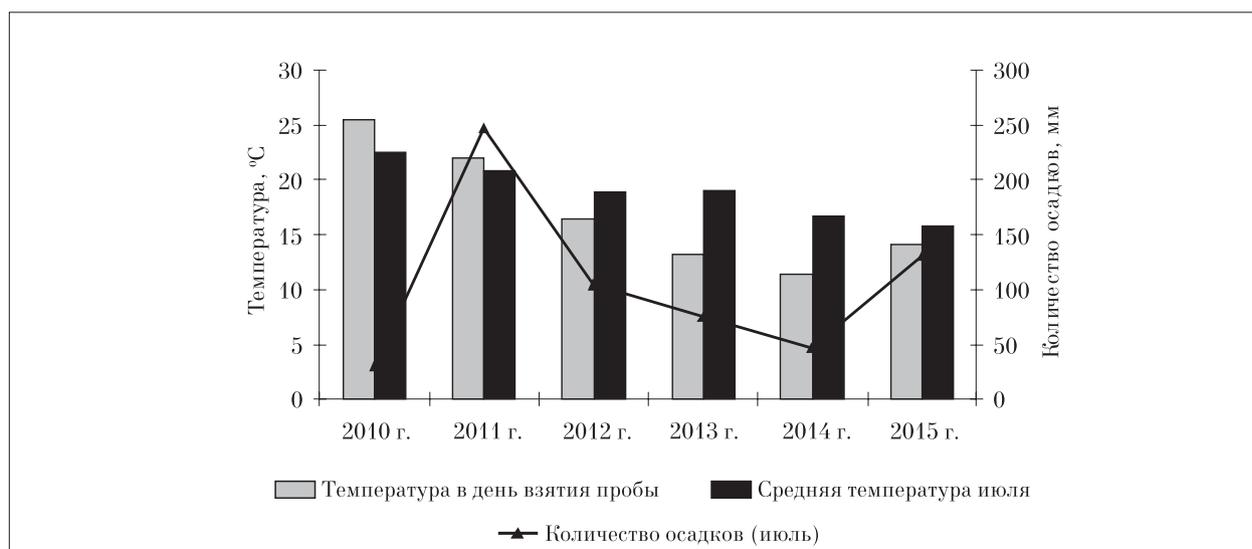


Рис. 2. Метеорологическая характеристика

личество осадков наблюдалось в 2010 г. (рис. 2). Осадки в июле 2010 г. отмечались всего 2 дня. Самое большое количество осадков было характерно для 2011 г., однако максимально дождливым по числу дней с осадками стал 2015 г. – 21 день. В июле 2011–2014 гг. число дней с осадками варьировало от 11 до 14.

**Результаты и обсуждение**

В соответствии с классификацией Шенникова [20], составленной на основе выявления экологического состава мезофитов, все исследуемые участки относятся к классу формаций настоящих лугов, но в зависимости от видового состава представлены разными группами формаций.

На исследованных участках зарегистрировано 419 видов беспозвоночных из 104 семейств и 15 отрядов насекомых, клещей, пауков и моллюсков (табл. 2, 3). Самым высоким разнообразием обладает отряд двукрылые (159 видов из 34 семейств). Единичными видами представлены отряды Blattoptera, Dermaptera и Mecoptera.

Участок № 10, расположенный на расстоянии 1,94 км от ОУХО, в течение всех лет исследования характеризовался как крупнозлаковый луг. Общее проективное покрытие на участке колебалось от 80 до 95%, большую часть покрытия давали такие злаки, как *Phleum pratense* L., *Bromus inermis* Leyss., *Dactylis*

*glomerata* L. Наиболее характерными для этого участка были моллюски *Fruticicola fruticum* (Müller) и *Succinea putris* (L.), прямокрылые *Phaneroptera falcata* Poda, *Bicolorana roeselii* Hagen., *Dectius verrucivorus* L., *Tettigonia viridissima* L., *Metrioptera brachyptera* L., полужесткокрылые (*Leptopterna dolabrata* (L.), *L. ferrugata* (Fl.), *Lygus pratensis* (L.), *Coriomeris scabricornis* (Pz.), *Labops sahlbergii* (Fl.), *Myrmus miriformis* (Fl.), *Nabis flavomarginatus* Scholtz), жесткокрылые (*Cetonia aurata* (L.), *Hippodamia tredecimpunctata* (L.), *Malachius bipustulatus* (L.), *Lagria hirta* (L.), *Oedemera femorata* (Scop.), *Mordella aculeata* L., *Gymnetron terminassiana* Smreczynsky), чешуекрылые *Cyaniris semiargus* Rott., *Hyponephele lycan* Rott. и *Heodes virgaureae* L., двукрылые *Melanostoma mellinum* (L.), *Helophilus paralellus* (Harris), *Sphaerophoria scripta* (L.), *Limnia unguicornis* (Scop.), *Euthycera chaerophylli* (F.), *Sphaerophoria scripta* (L.) *Tetanocera phyllophora* Melander, *Tetanocera elata* F.

На участке № 57, расположенном на расстоянии 4 км от ОУХО, общее проективное покрытие травостоя составляло 75–80% в 2010–2013 гг., а в 2014 г. снизилось до 50%. Основную часть покрытия на этом участке давали виды разнотравья: *Hypericum maculatum* Crantz, *Picris hieracioides* L., *Fragaria vesca* L. и другие. Злаки были представлены *Phleum pratense*, *Agrostis tenuis* Sibth., *Festuca pratensis* Huds., *Poa pratensis* L. В целом дан-

**Таблица 2**

Видовое разнообразие беспозвоночных обитателей травостоя настоящих суходольных лугов

Таксон	Число семейств	Доля семейств, в %	Число видов	Доля видов, в %
Odanata	3	2,9	7	1,7
Blattoptera	1	1,0	1	0,2
Dermaptera	1	1,0	1	0,2
Orthoptera	3	2,9	17	4,1
Heteroptera	7	6,8	36	8,6
Homoptera	4	3,9	22	5,3
Coleoptera	19	18,4	63	15,1
Neuroptera	1	1,0	2	0,5
Mecoptera	1	1,0	1	0,2
Hymenoptera	12	11,7	42	10,1
Lepidoptera	11	10,7	46	11,0
Diptera	34	33,0	159	38,1
Acariformes	1	1,0	2	0,5
Aranei	4	3,9	15	3,6
Mollusca	3	2,9	4	1,0
Всего	104	100	419	100

Таблица 3

Видовое разнообразие беспозвоночных обитателей травостоя в 2010–2015 годах

Таксон	Номер участка					
	10	57	60	103	111	139
Dermaptera	–	0,2±0,2	–	–	–	–
Blatoptera	0,7±0,4	–	0,4±0,4	0,3±0,3	0,3±0,3	0,3±0,3
Odanata	0,4±0,3	0,4±0,3	0,2±0,2	–	5,3±3,7	0,3±0,3
Orthoptera	7,1±2,3	16,1±4,3	19,1±3,6	6,9±2,3	8,6±1,5	21,4±2,7
Heteroptera	245,5±17,2	424,1±83,3	280,4±44,4	375±51,4	443±64,7	198,9±45,2
Homoptera	80,7±27	155,9±112,2	82,7±18,4	76,4±32,3	23,4±8,3	94,5±37,2
Coleoptera	35,4±3,5	68,3±10,8	68±21,9	35,3±7	76,7±19,5	54,5±6,8
Neuroptera	0,2±0,2	1,3±0,5	2,7±1,6	1,3±0,5	2,8±1,7	1,1±0,4
Hymenoptera	63±24,7	122,4±46,7	57,3±9,4	76,9±16,6	165,3±63,8	108,1±26,1
Lepidoptera	10,1±2,4	20,7±5,5	19,3±3,8	20,2±4,3	9,2±3,3	25,8±5,9
Diptera	126,7±40,8	174,1±31,3	228,7±52,4	151,7±33,8	345±125,3	243,3±37,4
Acari	5,9±2,5	–	–	1,7±0,9	–	0,6±0,6
Acariformes	40,8±7,2	67,6±13,1	60,7±17,4	13,6±5,6	67,5±19	44,5±2,8
Mollusca	3,8±1,6	2,0±2,0	–	0,3±0,3	–	–
Всего, экз.	620,4±65,6	1053,2±168	819,5±86	759,5±95,6	1147,0±214,3	793,3±108,1
Индекс Шеннона	1,63±0,04	1,67±0,08	1,47±0,05	1,57±0,05	1,45±0,07	1,78±0,03
Индекс Бергера Паркера	0,43±0,05	0,39±0,04	0,46±0,04	0,44±0,04	0,50±0,05	0,34±0,01

Примечание: прочерк «–» означает отсутствие группы на данном участке.

ное сообщество относено к группе формаций злаково-разнотравные луга. Беспозвоночными, характерными для данного участка, являются прямокрылые *Phaneroptera falcata*, *Bicolorana roeseli* Hagen., *Dectius verrucivorus*, *Metrioptera brachyptera* L., *Chrysochraon dispar* Germ., равнокрылые *Aphis fabae* Scop., *Lepyronia coleoptrata* (L.), жёсткокрылые *Cassida vibex* L., *Oedemera femorata*, *Subcoccinella vigintiquatuorpunctata* (L.), *Bromius obscurus* (L.), *Tomoxia bucephala* (Costa), чешуекрылые *Thymelicus lineola* O., *Hyponephele lycaon*, *Heodes virgaureae*, *Maniola jurtina* L., *Lasiommata petropolitana* Fabr., *Argynnis adippe* L., *Plebejus idas* L., двукрылые *Cheilosia illustrata* (Harris), *Chrysotoxum festivum* (L.), *Episyrphus balteatus* (DG), *Helophilus pendulus* (L.), *Leucozona glauca* (L.), *Xylota segnis* (L.), *Chlorops pumilionis* (Bjerkander), *Chrysops caecutiens* (L.) и *Haematopota pluvialis* (L.).

На участке № 60, расположенном на расстоянии 3,94 км от ОУХО, проективное покрытие в течение периода исследования изменялось от 70 до 97%, что связано было, вероятно, с условиями увлажнения. Этот участок относится к группе формаций разнотравно-злаковых лугов, как и предыдущий участок, однако отличается доминантами и видовым составом растительного сообщества. Злаки на нём дают большую часть покрытия и пред-

ставлены такими видами, как *Deschampsia cespitosa* (L.) Beauv., *Phleum pratense*, *Dactylis glomerata*, видами рода *Agrostis*. Основными представителями разнотравья являлись: *Hypericum maculatum* и *Geum rivale* L. Характерными беспозвоночными для данного участка являются: прямокрылые *Phaneroptera falcata*, *Bicolorana roeseli*, *Dectius verrucivorus*, *Bicolorana bicolor*, *Omocestus viridulus*, *Metrioptera brachyptera*, пенница *Lepyronia coleoptrata*, полужёсткокрылые *Leptopterna dolabrata* (L.) *Graphosoma lineatum* (L.), *Eysarcoris aeneus* (Scop.), жёсткокрылые *Lagria hirta* (L.), *Mordella aculeata* L., *Dolichosoma lineare* (Rossi), *Coccinella septempunctata* L., перепончатокрылые *Vespa austriaca* (Panzer), *Apis mellifera* L., бабочки *Hyponephele lycaon* Rott., *Thymelicus lineola*, *Heodes virgaureae*, *Plebejus idas* L., *Polygonia c-album* L., *Pieris rapae* L., *Plebejus idas* L., *Gonopteryx rhamni* L., двукрылые *Limnia unguicornis* (Scop.), *Bombylella atra* (Scop.) *Empis livida* L., *Pipizella virens* F., *Pipiza bimaculata* Mg., *Leptogaster cylindrica* (DG).

Участок № 103, расположенный на расстоянии 8,68 км от ОУХО, относится к крупнозлаковым лугам. На данном лугу преобладающим видом является *Dactylis glomerata* с небольшой долей *Phleum pratense*. Из разнотравья в отдельные годы большое проективное покрытие давали *Cirsium setosum* (Willd.) Bess. и

*Taraxacum officinale* Wigg. У остальных видов покрытие было низкое. В целом же общее проективное покрытие на участке колебалось от 70 до 90%. Типичными видами хортобионтов этого участка являются: моллюск *Succinea putris*, прямокрылые *Phaneroptera falcata*, *Bicolorana roeselii*, *Dectius verrucivorus* L., *Chorthippus brunneus* Thnb., *Ch. biguttulus* (L.), *Chrysochraon dispar* (Germar), *Tetrix bipunctata* (L.), *T. tenuicornis* (Sahlberg), равнокрылые *Cicadella viridis* (L.) и *Lepyronia coleoptrata*, полужесткокрылые *Palomena prasina* (L.), жесткокрылые *Calvia quatuordecimguttata* (L.), *Propylea quatuordecimpunctata* (L.), *Lagria hirta* и *Oedemera femorata*, перепончатокрылые *Apis mellifera*, чешуекрылые *Coenonympha glycerion* L., *Aphantopus hyperantus* L., *Thymelicus lineola* O., *Brenthis ino* Rott., *Everes agriades* (Pallas), *Heodes virgaureae* (L.), *Hyponephrole lycan*, *Cupido agriades* Pall., двукрылые *Platycheirus peltatus* (Mg.), *Leucozона laternarius* (Müller), *Limnia unguicornis*.

Участок № 111, расположенный на расстоянии 9,83 км от ОУХО, является мелкозлаково-разнотравным лугом. Общее проективное покрытие на лугу составляло от 70 до 85%. Небольшая часть покрытия была представлена злаками: *Phleum pratense*, видами рода *Poa* и *Agrostis*. Основную часть покрытия давал ежегодно *Pimpinella saxifraga* L. (15–27%). Характерными видами беспозвоночных на участке являются прямокрылые: *Phaneroptera falcata*, *Bicolorana roeselii*, *Dectius verrucivorus*, *Chorthippus biguttulus*, *Tetrix bipunctata*, *T. tenuicornis*. Sahlb.; полужесткокрылые *Eurydema oleracea* (L.), *Leptopterna dolabrata*, *Nabis flavomarginatus* Scholtz; жесткокрылые *Cryptocephalus sericea* (L.), *Oedemera virescens* (L.); чешуекрылые: *Thymelicus lineola* O., *Coenonympha glycerion* Borkh., *Aphantopus hyperantus*, *Heodes virgaureae*, *Hyponephrole lycan*; двукрылые: *Rhagio scolapocus* (L.), *Chrysops divaricatus* Lw., *Sphaerophoria scripta* (L.), *Epistrophe grossulariae* (Mg.).

Общее проективное покрытие на участке № 139 изменялось незначительно и составляло в разные годы от 80 до 90%. Этот участок расположен на расстоянии 21,35 км от ОУХО. В первые годы наблюдений основную часть покрытия давали такие виды, как *Dactylis glomerata*, *Deschampsia cespitosa*, *Phleum pratense*, *Festuca pratensis* Huds., а в последующем – *Carex hirta* L. Данный луг относился к группе формаций злаково-разнотравные луга. Количество видов разнотравья было достаточно большим, хотя каждый вид имел небольшое

проективное покрытие. Характерными для данного участка являются моллюск *Succinea putris*, прямокрылые *Phaneroptera falcata*, *Bicolorana roeselii*, *Dectius verrucivorus*, *Tetrix bipunctata*, *Podisma pedestris*. L., полужесткокрылые: *Leptopterna ferrugata*, *Orthops campestris* (L.), *Graphosoma lineatum*, жесткокрылые: *Protaetia cuprea metallica* (Herbst), *Oedemera virescens* и *Lagria hirta*, чешуекрылые: *Thymelicus lineola*, *Hyponephrole lycan*., *Plebejus idas* L., *Heodes virgaureae*, *Cyaniris semiargus* Rott., *Argynnis aglaja* L., *Pieris rapae*, *P. napi* L., двукрылые: *Eristalinus aeneus* (Scop.), *Eristalis interrupta* (Poda), *Leucozона laternarius*, *Pipizella virens* (F.), *Syritta pipiens* (L.), *Volucella pellucens* (L.).

Данные о численности беспозвоночных на участках представлены в таблице 3. Общая численность беспозвоночных обитателей травостоя варьировала от 620,4±65,6 до 1147,0±214,3 экз./100 взмахов. Максимальная численность хортобионтов наблюдалась на участках № 57 и 111. Доминирующими группами на всех участках были двукрылые (Diptera) и полужесткокрылые (Heteroptera). Наибольшим значением индекса Шеннона и минимальным доминированием по индексу Бергера-Паркера характеризуется участок № 139.

Для сравнения лугов по структуре сообществ был использован кластерный анализ. В качестве меры сходства выбрали индекс Чекановского-Сьёренсена, рассчитанного по количественным данным. Результаты анализа показывают, что участки № 10 и № 103 выделяются в отдельный кластер как по составу хортобионтов, так и по составу растений (рис. 3). Они отличаются от остальных участков более низкой общей численностью беспозвоночных (от 630 до 862 экз./100 взмахов), долей двукрылых около 20% и долей полужесткокрылых больше 39%. В фитоценоотическом плане эти луга характеризуются низким уровнем разнообразия растительности. Во второй кластер вошли участки № 60 и 139 с общей численностью от 888 до 819 экз./100 взмахов, долей двукрылых больше 25%. Обособленно расположены на дендрограмме участки № 57 и 111, которые отличаются самой высокой общей численностью хортобионтов (более 1000 экз./100 взмахов).

Анализ сообществ наземных беспозвоночных методом главных компонент позволяет определить факторы, которые оказывают влияние на структуру населения беспозвоночных. Более 60% всей дисперсии определяют три первые оси главных компонент (табл. 4). Первая компонента связана с особенностями

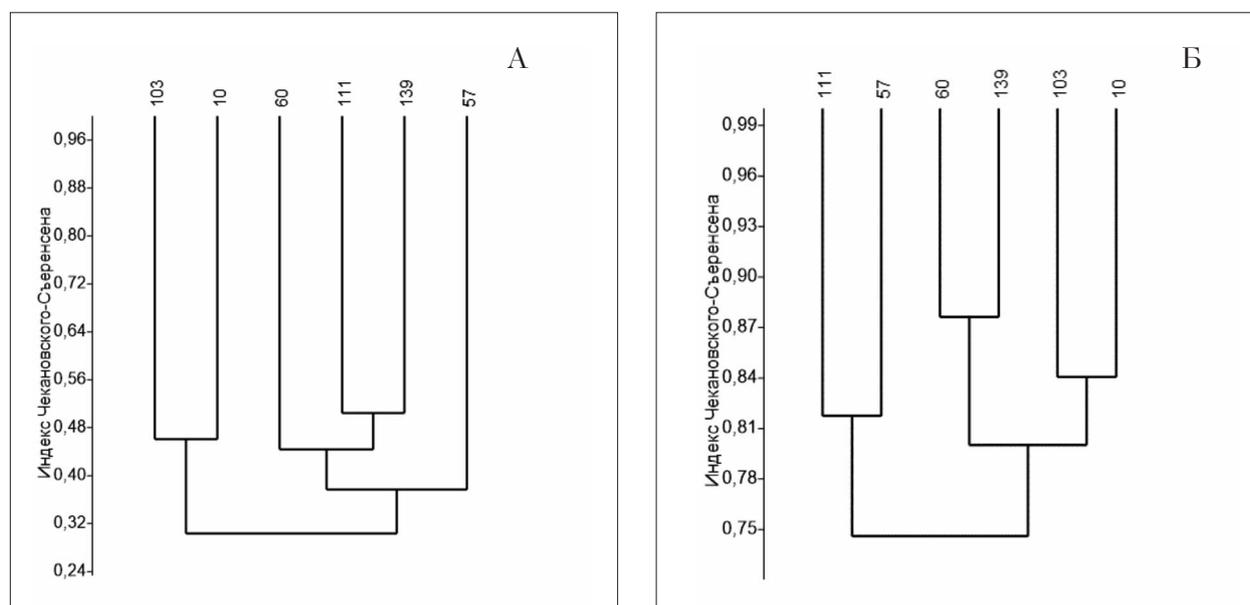


Рис. 3. Кластерные диаграммы сходства лугов по составу растений (А) и по хортобионтов (Б)

Таблица 4

Корреляция значений главных компонент с факторами среды и обилием групп беспозвоночных

Переменная	Компонента 1	Компонента 2	Компонента 3
Значения собственных векторов (дисперсия по осям)	2,411	2,066	1,630
Доля дисперсии от общей суммы (в процентах)	24,114	20,655	16,299
Температура в день взятия проб	-0,12	-0,11	<b>0,26</b>
Среднемесячная температура (июль)	-0,23	-0,14	<b>0,36</b>
Количество осадков (июль)	-0,22	<b>-0,39</b>	-0,14
Число дней с осадками (июль)	0,14	-0,06	<b>-0,40</b>
Расстояние от ОУХО	-0,21	-0,03	-0,11
Шкала увлажнения (FE)	0,15	-0,33	-0,14
Шкала активного богатства и засоленности почвы (NS)	0,01	<b>-0,38</b>	0,15
Шкала переменности увлажнения (VF)	-0,02	0,28	-0,07
Шкала аллювиальности (A)	0,01	0,10	0,01
Шкала пастбищной дигрессии (PD)	-0,20	-0,03	-0,01
Число видов растений	<b>-0,38</b>	-0,31	0,03
Индекс Шеннона для растительных сообществ	<b>-0,37</b>	<b>-0,37</b>	0,07
Высота травостоя	<b>0,29</b>	-0,06	0,15
Dermaptera	-0,23	0,10	0,20
Blatoptera	0,13	0,06	-0,07
Odanata	-0,46	0,08	-0,10
Orthoptera	-0,24	<b>-0,53</b>	<b>0,55</b>
Heteroptera	-0,37	0,37	<b>0,51</b>
Homoptera	-0,03	0,23	<b>0,80</b>
Coleoptera	-0,58	<b>-0,43</b>	0,31
Neuroptera	-0,46	-0,34	-0,22
Hymenoptera	<b>-0,82</b>	0,17	-0,39
Lepidoptera	-0,32	<b>-0,46</b>	-0,13
Diptera	<b>-0,67</b>	-0,02	-0,25
Acari	0,30	0,15	-0,05
Aranei	<b>-0,70</b>	-0,18	0,32
Mollusca	0,10	0,16	-0,29

Примечание. Жирным шрифтом выделены наиболее высокие значения корреляции экологических факторов с осями

растительного сообщества (число видов растений, индекс разнообразия Шеннона и высота травостоя), она оказывает влияние на группы Hymenoptera, Diptera и Aranei. Вторая компонента характеризует особенности режима увлажнения и богатства почв и определяет обилие Orthoptera. Третья компонента включает метеорологические факторы (температура воздуха и количество осадков), она обуславливает обилие Orthoptera, Heteroptera и Homoptera.

*Работа выполнена в рамках государственного задания Института биологии Коми НЦ УрО РАН по темам «Оценка последствий антропогенного воздействия на природные и трансформированные экосистемы подзоны южной тайги» № гос. регистрации 115020310080 «Животный мир европейского северо-востока России в условиях хозяйственного освоения и изменения окружающей среды» № гос. регистрации 115012860088.*

### Заключение

Исходя из полученных данных, можно заключить, что видовой состав насекомых на исследованной территории типичен для подзоны южной тайги. Фаунистический комплекс луговых экосистем насчитывает 419 видов беспозвоночных из 104 семейств. Выявлена специфика изменений состава сообществ беспозвоночных луговых экосистем. Основу комплекса беспозвоночных составляют отряды Diptera и Heteroptera. Вместе они составляют более половины численности хортобионтов. Анализ главных компонент показывает, что факторами, влияющими на видовой состав и численность отдельных групп насекомых, являются экологические и флористические особенности обследованных лугов. Изменения структуры сообществ хортобионтов луговых экосистем зависит преимущественно от природных факторов: структуры растительности, почвенных условий и метеорологических факторов. Деятельность объекта уничтожения химического оружия не оказывает существенного влияния на сообщества беспозвоночных-хортобионтов.

### Литература

1. Chowdhury G. R., Datta U., Zaman S., Mitra A. Ecosystem Services of Insects // Abhijit Mitra. Biomed J Sci & Tech Re. 2017. V. 1. No. 2. DOI: 10.26717/BJSTR.2017.01.000228.  
2. Багачанова А.К., Нарчук Э.П. Двукрылые насекомые (Diptera) как индикаторы динамичности экосистем луговых аласов Центральной Якутии // Энтомологическое обозрение. 2003. Т. 82. Вып. 2. С. 300–309.

3. Зверева Е.Л. Влияние загрязнения среды промышленными выбросами на комплексы короткоусых двукрылых (Diptera, Brachycera) // Энтомологическое обозрение. 1993. Т. 72. Вып. 3. С. 558–569.  
4. Чащина О.Е. Пространственная дифференциация населения беспозвоночных – обитателей травостоя: подход с использованием дискриминантного анализа // Вестник Оренбургского государственного университета. 2007. № 10 (74). С. 135–138.  
5. Ермакова Ю. В., Ноговицына С. Н., Евдокарлова Т. Г. О структуре хортобионтных членистоногих реликтовых степей долины р. Лена (Центральная Якутия) // Проблемы региональной экологии. 2008. № 4. С. 34–37.  
6. Eriksson O., Bolmgren K., Westin A., Lennartsson T. Historic hay cutting dates from Sweden 1873–1951 and their implications for conservation management of species-rich meadows // Biological Conservation. 2015. V. 184. No. 4. P. 100–107.  
7. Bruppacher L., Pellet J., Arlettaz R., Humbert J.-Y. Simple modifications of mowing regime promote butterflies in extensively managed meadows: Evidence from field-scale experiments // Biological Conservation. 2016. V. 196. No. 4. P. 196–202.  
8. Marini L., Fontana P., Battisti A., Gaston K. J. Response of orthopteran diversity to abandonment of seminatural meadows // Agriculture, Ecosystems & Environment. 2009. V. 132. No. 3–4. P. 232–236.  
9. Brandle M., Amarell U., Auge H. et al. Plant and insect diversity along a pollution gradient: understanding species richness across trophic levels // Biodiversity Conservation. 2001. V. 10. P. 1497–1511.  
10. Kozlov M.V., Zvereva E.L., Zverev V.E. Impacts of point polluters on terrestrial biota. Berlin ect.: Springer, 2009. 466 p.  
11. Kozlov M.V., Lvovsky A.L., Mikkola K. Abundance of day-flying lepidoptera along an air pollution gradient in the northern boreal forest zone // Entomologica Fennica. 1996. V. 7. No. 3. P. 137–144.  
12. Kozlov M.V. Changes in ladybird (Coleoptera: Coccinellidae) communities along a steep pollution gradient in subarctic forests of European Russia // European Journal of Entomology. 2015. V. 112. No. 4. P. 728–733.  
13. Алалыкина Н.М., Юшин А. О состоянии наземной энтомофауны территории зоны влияния объекта уничтожения химического оружия (УХО) // Актуальные проблемы регионального экологического мониторинга: научный и образовательный аспекты: Сборник материалов Всероссийской научной школы. Киров, 2006. С. 82–86.  
14. Пестов С.В., Кулакова О. И., Татаринцов А.Г. Прямокрылые (Orthoptera) Оричевского района Кировской области // Экология родного края: проблемы и пути решения: Сб. материалов Всероссийской научно-практической конференции с международным участием. Книга 1. Киров, 2016. С. 415–417.  
15. Чичков Б.М. Особенности надвидовой структуры хортобионтного комплекса беспозвоночных в

агроценозах и естественных фитоценозах // Известия Челябинского НЦ. 2004. Вып. 1 (22). С. 192–196.

16. Schaffers A.P., Raemakers I.P., Sykora K.V., ter Braak C.J.F. Arthropod assemblages are best predicted by plant species composition // *Ecology*. 2008. V. 89. P. 782–794.

17. Nesterkov A.V., Vorobeichik E.L. Changes in the structure of chortobiont invertebrate community exposed to Emissions from a copper smelter // *Russian Journal of Ecology*. 2009. V. 40. No. 4. P. 286–296.

18. Ашихмина Т.Я., Домрачева Л.И., Домнина Е.А., Кантор Г.Я., Кочурова Т.И., Кондакова Л.В., Огородникова С.Ю., Олькова А.С., Панфилова И.В. Система биологического мониторинга компонентов природной среды в районе объекта хранения и уничтожения химического оружия «Марадьковский» Кировской области // *Теоретическая и прикладная экология*. 2008. № 4. С. 32–38.

19. Фасулати К.К. Полевое изучение наземных беспозвоночных. М.: Высшая школа, 1971. 424 с.

20. Шенников А.П. Луговедение. Л., 1941. 510 с.

21. Работнов Т.А. Фитоценология. М., 1983. 296 с.

22. Ипатов В.С. Описание фитоценоза. СПб, 1998. 151 с.

23. Раменский Л.Г., Цаценкин И.А., Чижигов О.Н., Антипин Н.А. Экологическая оценка кормовых угодий по растительному покрову. М., 1956. 472 с.

24. Зубкова Е.В., Ханина Л.Г., Грохлина Т.И., Дорогова Ю.А. Компьютерная обработка геоботанических описаний по экологическим шкалам с помощью программы EcoScaleWin: учебное пособие. Йошкар-Ола, 2008. 96 с.

25. Домнина Е.А. Экологическая оценка местообитаний луговых участков с использованием шкал Раменского // *Экология биосистем: проблемы изучения, индикации и прогнозирования*. Сборник материалов III Международной научно-практической конференции, посвященной 85-летию Астраханского государственного университета. Астрахань, 2017. С. 60–65.

26. Hammer Ø., Harper D.A.T., Ryan P.D. PAST: Paleontological statistics software package for education and data analysis // *Palaeontologia Electronica*. 2001. V. 4(1). 9 p.

27. Новаковский А.Б. Взаимодействие Excel и статистического пакета R для обработки данных в экологии // *Вестник института биологии Коми научного центра Уральского отделения РАН*. 2016. № 3 (197). С. 26–33.

## References

1. Chowdhury G. R, Datta U., Zaman S. and Mitra A. Ecosystem Services of Insects // *Abhijit Mitra. Biomed J Sci & Tech Res*. 2017. V. 1. Iss. 2. DOI: 10.26717/BJSTR.2017.01.000228

2. Bagachanova AK, Narchuk E.P. Diptera insects (Diptera) as indicators of the dynamics of ecosystems in meadow alas of Central Yakutia // *Entomologicheskoe obozrenie*. 2003. V. 82. No. 2. P. 300–309 (in Russian).

3. Zvereva E.L. Influence of industrial pollution on industrial complexes of short-witted Diptera (Diptera, Brachycera) // *Entomologicheskoe obozrenie*. 1993. V. 72. Vyp. 3 P. 558–569 (in Russian).

4. Chaschina O.E. Spatial differentiation of the population of invertebrates - the inhabitants of the grass stand: an approach using discriminant analysis // *Vestnik Orenburgskogo gosudarstvennogo universiteta*. 2007. No. 10 (74). P. 135–138 (in Russian).

5. Ermakova Yu.V., Nogovitsyna S.N., Evdokarova T.G. About the structure of chortobiont arthropods of relic steppes of the valley of the river. Lena (Central Yakutia) // *Problemy regionalnoj ekologii*. 2008. No. 4. P. 34–37 (in Russian).

6. Eriksson O., Bolmgren K., Westin A., Lennartsson T. Historic hay cutting dates from Sweden 1873–1951 and their implications for conservation management of species-rich meadows // *Biological Conservation*. 2015. V. 184. No. 4. P. 100–107.

7. Bruppacher L., Pellet J., Arlettaz R., Humbert J.-Y. Simple modifications of mowing regime promote butterflies in extensively managed meadows: Evidence from field-scale experiments // *Biological Conservation*. 2016. V. 196. No. 4. P. 196–202.

8. Marini L., Fontana P., Battisti A., Gaston K. J. Response of orthopteran diversity to abandonment of seminatural meadows // *Agriculture, Ecosystems & Environment*. 2009. V. 132. No. 3–4. P. 232–236.

9. Brandle M., Amarell U., Auge H. et al. Plant and insect diversity along a pollution gradient: understanding species richness across trophic levels // *Biodiv. Conserv.* 2001. No. 10. P. 1497–1511.

10. Kozlov M.V., Zvereva E.L., Zverev V.E. Impacts of point polluters on terrestrial biota. Berlin ect.: Springer, 2009. 466 p.

11. Kozlov M.V., Lvovsky A.L., Mikkola K. Abundance of day-flying lepidoptera along an air pollution gradient in the northern boreal forest zone // *Entomologica Fennica*. 1996. V. 7. No. 3. P. 137–144.

12. Kozlov M.V. Changes in ladybird (Coleoptera: Coccinellidae) communities along a steep pollution gradient in subarctic forests of European Russia // *European Journal of Entomology*. 2015. V. 112. No. 4. P. 728–733.

13. Alalykina N.M., Yushin A. About the state of the ground entomofauna of the zone of influence of the chemical weapons destruction facility // *Aktualnye problemy regional'nogo ekologicheskogo monitoringa: nauchnyy i obrazovatelnyy aspekty: Sbornik materialov Vserossiyskoy nauchnoy shkoly*. Kirov, 2006. P. 82–86 (in Russian).

14. Pestov S.V., Kulakova O.I., Tatarinov A.G. Orthopterans of Orichovsky district of the Kirov region // *Ecology of the native land: problems and ways of their solving: Sbornik materialov Vserossiyskoy nauchno-prakticheskoy konferentsii s mezhdunarodnym uchastiem*. Kniga 1. Kirov, 2016. P. 415–417 (in Russian).

15. Chichkov B.M. Features of the supersedal structure of the hortobiont complex of invertebrates in agroce-

noses and natural phytocenoses // *Izvestiya Chelyabinskogo nauchnogo tsentra*. 2004. No. 1 (22). P. 192–196 (in Russian).

16. Schaffers A.P., Raemakers I.P., Sykora K.V., ter Braak C.J.F. Arthropod assemblages are best predicted by plant species composition // *Ecology*. 2008. V. 89. P. 782–794.

17. Nesterkov A.V., Vorobeichik E.L. Changes in the structure of chortobiont invertebrate community exposed to Emissions from a copper smelter // *Russian Journal of Ecology*. 2009. V. 40. No. 4. P. 286–296.

18. Ashimina T.Ya., Domracheva L. Domnina EA, Kantor G.Ya., Kochurova T.I., Kondakova L.V., Ogorodnikov S.Yu., Olkova A.S., Panfilova I.V. System of biological monitoring of environmental components in the area of the object of storage and destruction of chemical weapons “Maradykovskiy” of the Kirov region // *Teoreticheskaya i prikladnaya ekologiya*. 2008. No. 4. P. 32–38 (in Russian).

19. Fasulati K.K. Field study of terrestrial invertebrates. Moskva: Vysshaya shkola, 1971. 424 p. (in Russian).

20. Shennikov A.P. Meadow science. Leningrad. 1941. 510 p. (in Russian).

21. Rabotnov T.A. Phytocenology. Moskva, 1983. 296 p. (in Russian).

22. Ipatov V.S. Description of phytocenosis. St. Petersburg, 1998. 151 p. (in Russian).

23. Ramensky L.G., Tsatsenkin I.A., Chizhikov O.N., Antipin N.A. Ecological assessment of fodder land by vegetation cover. Moskva, 1956. 472 p. (in Russian).

24. Zubkova E.V., Khanina L.G., Grokhlina T.I., Dorogova Yu. A. Computer processing of geobotanical descriptions on ecological scales using the program EcoScaleWin: Uchebnoe posobie. Yoshkar-Ola. 2008. 96 p. (in Russian).

25. Domnina E.A. Ecological assessment of meadow habitats using Ramensky scales // *Ecology of biosystems: problems of research, indication, and forecasting. Sbornik materialov III Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii, posvyashchennoy 85-letiyu Astrakhanskogo gosudarstvennogo universiteta*. Astrakhan, 2017. P. 60–65 (in Russian).

26. Hammer Ø., Harper D.A.T., Ryan P.D. PAST: Paleontological statistics software package for education and data analysis // *Palaeontologia Electronica*, 2001. No. 4(1). 9 p.

27. Novakovskiy A.B. Interaction of Excel and statistical package R for data processing in ecology // *Vestnik instituta biologii Komi nauchnogo tsentra Uralskogo otdeleniya RAN*. 2016. No. 3 (197). P. 26–33 (in Russian).

УДК 631.46

## Почвенные водоросли и цианобактерии хвойных фитоценозов с разным уровнем антропогенной нагрузки

© 2017. Л. В. Кондакова<sup>1,2</sup>, д. б. н., профессор,  
Л. И. Домрачева<sup>1,3</sup>, д. б. н., профессор,  
К. А. Безденежных<sup>2</sup>, аспирант, И. А. Кондакова<sup>2</sup>, магистр, доцент,  
Т. Я. Ашихмина<sup>1,2</sup>, д. т. н., профессор, зав. кафедрой, зав. лабораторией,

<sup>1</sup> Институт биологии Коми НЦ УрО РАН,  
167982, Россия, Сыктывкар, ул. Коммунистическая, 28,

<sup>2</sup> Вятский государственный университет,  
610000, Россия, г. Киров, ул. Московская, 36,

<sup>3</sup> Вятская государственная сельскохозяйственная академия,  
610017, Россия, г. Киров, Октябрьский проспект, 133,

e-mail: usr11521@vyatsu.ru

Проведён сравнительный анализ альгофлоры хвойных фитоценозов с разным уровнем антропогенной нагрузки: соснового леса в охранной зоне заповедника «Нургуш» (фоновый участок), сосновых и еловых лесов в районе объекта уничтожения химического оружия «Марадьковский», пригородных лесов г. Кирова. В изученных хвойных фитоценозах выявлено 97 видов и разновидностей водорослей и ЦБ, в том числе Cyanobacteria – 23, Chlorophyta – 47, Ochrophyta – 15, Bacillariophyta – 12. Во всех изученных хвойных фитоценозах преобладали зелёные водоросли, составляя 42,8–65,4% видового разнообразия. Это представители родов *Chlamydomonas*, *Chlorococcum*, *Chlorella*, *Bracteacoccus*, *Coccomyxa*, *Pseudococcomyxa*, *Klebsormidium*. Охрофитовые водоросли (желтозелёные и эустигматофитовые) отмечены на всех участках, их соотношение составляло 13,0–21,2%. Выявлены виды родов *Pleurochloris*, *Botrydiopsis*, *Characiopsis*, *Eustigmatos*, *Vischeria*. Из цианобактерий встречены представители родов *Nostoc*, *Tolypothrix*, *Anabaena*, *Phormidium*, *Leptolyngbya*, *Borzia*, *Microcoleus*, *Oscillatoria*, *Schizothrix*.

Анализ альгофлоры хвойных лесов фоновой территории и территорий, испытывающих техногенную (район объекта «Марадьковский») и антропогенную нагрузку (пригородные леса), показывает умеренное сходство. Коэффициенты Сьёренсена-Чекановского составляют 40,4–57,5%.

Экологическая структура альгофлоры хвойных лесов представлена эдафотрофными видами, составляющими 92,8–97,5% видовой разнообразия. В сравниваемых фитоценозах преобладают представители Ch-, C-, X- и B-жизненных форм – видов, отличающихся исключительной выносливостью к различным экстремальным условиям и занимающих значительное место в формировании альгосинузий в самых различных почвах.

Определение количественного обилия микрофототрофов до начала действия объекта и после его окончания показало, что в почвах сосновых и еловых лесов преобладают зелёные и диатомовые водоросли с колебаниями численности клеток в диапазоне от 250 до 1200 тыс./г почвы и с колебаниями биомассы от 25 до 348 кг/га в 2005 г. В 2016–2017 гг. численность водорослей в почве составляла 59–280 тыс./г вследствие иных гидротермических условий, существующих в годы наблюдений. Параллельные определения запасов грибной биомассы показали, что её величина колеблется в пределах от 247 до 2400 кг/га, существенно превосходя запасы водорослевой биомассы.

Альгофлора изучаемых хвойных фитоценозов соответствует зональному типу. По видовому разнообразию и численности клеток доминируют зелёные водоросли. Отмечены представители жёлтозелёных, эустигматофитовых и диатомовых водорослей и цианобактерий. Антропогенная нагрузка на почву в изученных хвойных фитоценозах не приводит к нарушению характерной для почв лесной зоны структуры альгосинузий.

**Ключевые слова:** водоросли, цианобактерии, хвойный фитоценоз, численность клеток, экологическая структура альгофлоры, альгосинузии.

## Soil algae and cyanobacteria of coniferous phytocenosis with different levels of anthropogenic impact

L. V. Kondakova<sup>1,2</sup>, L. I. Domracheva<sup>1,3</sup>, K. A. Bezdenezhnykh<sup>2</sup>,  
I. A. Kondakova<sup>2</sup>, T. Ya. Ashikhmina<sup>1,2</sup>,

<sup>1</sup>Institute of Biology of the Komi Science Centre of the Ural Division RAS,  
28 Kommunisticheskaya St., Syktyvkar, Russia, 167982,

<sup>2</sup>Vyatka State University,  
36 Moskovskaya St., Kirov, Russia, 610000,

<sup>3</sup>Vyatka State Agricultural Academy,  
133 Oktyabrskiy Prospect, Kirov, Russia, 610017,  
e-mail: usr11521@vyatsu.ru

A comparative analysis of the algal flora of coniferous phytocenoses with different levels of anthropogenic impact was carried out: pine forest in the buffer zone of the “Nurgush” Nature Reserve (background site), pine and spruce forests near the chemical weapons destruction plant Maradykovskiy, and suburban forests of the city of Kirov. 97 species and varieties of algae and Cyanobacteria were identified in the studied phytocenoses, including Cyanobacteria – 23, Chlorophyta – 47, Ochrophyta – 15, Bacillariophyta – 12. In all the studied coniferous phytocenoses green algae prevailed, amounting to 42.8–65.4% species diversity. These are representatives of the genera Chlamydomonas, Chlorococcum, Chlorella, Bracteacoccus, Cocomyxa, Pseudococomyxa, Klebsormidium. Ochrophyte algae (yellow-green and eustigmatophyte) are noted on all sites, their ratio was 13.0–21.2%. The species of the genera Pleurochloris, Botrydiopsis, Characiopsis, Eustigmatos, Vischeria, Characiopsis were identified. Of the cyanobacteria, representatives of the genera Nostoc, Tolypothrix, Anabaena, Phormidium, Leptolyngbya, Borzia, Microcoleus, Oscillatoria, and Schizothrix were encountered.

Analysis of algal flora of coniferous forests of the background territory and territories experiencing anthropogenic (area of the plant “Maradykovsky”) and anthropogenic impact (suburban forests) shows moderate similarity. Sj rensen-Chekanovsky Index is 40.4–57.5%.

The ecological structure of algal flora of coniferous forests is represented by edaphophilous species, which constitute 92.8–97.5% of species diversity. In the comparative phytocenoses, representatives of Ch-, C-, X- and B-life forms predominate – species that are endowed with exceptional endurance to various extreme conditions and occupy a significant place in the formation of algosynusia in a different of soils.

Quantitative indices of algae and cyanobacteria of monitoring sites range from 59.3 to 280.5 thousand cells/g of soil. The abundance of cells is dominated by green algae.

Assessing quantitative abundance of micro phototrophes before implementing the plant and after its stopping showed that in the soil of pine and spruce forests green and diatomic algae predominate. In 2005 the quantity varied from 25 to 1200 thousand cells/g of soil and biomass varied from 25 to 348 kg/ha. In 2016–2017 the quantity of algae in soil varied from 59 to 280 thousand calls/g, as a result of other hydrothermal conditions during the survey period. At the same time the fungi biomass varied from 247 to 24000 kg/ha, thus it considerably exceeds the algae biomass.

The algal flora of the coniferous phytocenoses studied corresponds to the zonal type. By species diversity and abundance of cells, green algae dominate. Representatives of yellow-green, eustigmatophyte and diatom algae and cyanobacteria were noted. Anthropogenic impact on soil in the studied coniferous phytocenoses does not lead to violation of the structure of algosynusia characteristic for soils of the forest zone.

**Keywords:** algae, cyanobacteria, coniferous phytocenosis, number of cells, ecological structure of algophlora, algosynusia.

Древесная растительность является мощным почвообразующим фактором и оказывает существенное влияние на свойства почвы и её живое население, в том числе на почвенные водоросли и цианобактерии (ЦБ), постоянно обитающие в лесных экосистемах. Видовой состав водорослей и ЦБ – достаточно постоянный признак для характеристики лесного биогеоценоза [1]. Различные отделы водорослей специфичны по своей биохимической природе и экологическим особенностям, их видовой состав в значительной мере оказывает влияние на метаболизм биогеоценоза в целом. Они входят составной частью в соответствующие экосистемы, принимают активное участие в почвообразовательных процессах, накоплении органического вещества и за счёт активности гетероцистных ЦБ – фиксированного азота. Экзометаболиты водорослей и ЦБ содержат биологически активные вещества, которые оказывают большое влияние на другие компоненты почвенного яруса, способствуя активизации микробиологических процессов и очистке почвы от фитопатогенов.

Сообщества водорослей и ЦБ хвойных лесов изучены недостаточно. Сведения о видовом составе и их численности обобщены в монографиях [1–2]. Имеются отдельные данные по численности и видовому составу альгофлоры хвойных лесов [3–5, 13]. Согласно опубликованным данным, в хвойных лесах на типичных подзолистых или дерново-подзолистых почвах отмечается большое сходство в соотношении отдельных групп водорослей, составе доминирующих форм и их численности. Сообщества почвенных микрофототрофов хвойных лесов характеризуются невысоким видовым разнообразием и численностью клеток [1]. Наибольшим числом видов представлены зелёные и жёлтозелёные водоросли. Доминантами сообществ являются представители родов: *Chlorococcum*, *Chlorella*, *Chlamydomonas*, *Bracteacoccus*, *Klebsormidium*, *Stichococcus* (Chlorophyta), *Botrydiopsis*, *Pleurochloris*, *Characiopsis* (Ochrophyta). Факторами, лимитирующими развитие водорослей и ЦБ в хвойных лесах, являются: неблагоприятное действие опада, кислая реакция почвы, низкая интенсивность света, менее благоприятные условия увлажнения. Преимущественно выживают и вегетируют виды зелёных и жёлтозелёных водорослей, устойчивых к затенению, пониженным значениям pH, недостаточной влажности: *Bracteacoccus minor*, *Chlorosarcinopsis minor*, *Chlamydomonas gelatinosa*, *Ch. gloeogama*, *Ch. snowiae*, *Pleurochloris imitans*,

*Heterococcus viridis* и др. [6]. При этом доказано, что альгологический мониторинг позволяет установить уровень негативного воздействия на экосистемы [7].

Целью исследования являлось изучение альгофлоры фоновой и испытывающих антропогенную нагрузку хвойных экосистем подзоны южной тайги.

### Объекты и методы исследования

Главными хвойными породами подзоны южной тайги являются ель и сосна. Так, в Кировской области сосновые насаждения составляют 22,3%, еловые – 27,3% [8]. Сосновые леса являются интразональным типом растительности, произрастают на древнеаллювиальных песчаных отложениях речных террас и в районах залегания глубоких крупнозернистых флювиогляциальных песков. Еловые леса распространены на моренных и покровных суглинках, на двучленных отложениях, на флювиогляциальных песках, подстилаемых суглинками.

Изучаемые лесные экосистемы находятся на территориях: охранной зоны государственного природного заповедника (ГПЗ) «Нургуш», (фоновый участок), хвойных лесов в окрестностях п. Марадыково, пригородных сосновых лесов г. Кирова (Заречный парк, п. Порошино и п. Сидоровка).

Отбор проб для альгологического анализа проводили в 2005 и в 2012–2017 гг., средняя проба почвенного образца составлялась согласно требованиям альгологического анализа [1]. Видовой состав альгофлоры изучали постановкой чашечных культур со стёклами обрастания [10], численность клеток определяли прямым микроскопированием на мазках, биомассу микроорганизмов – объёмно-расчётным методом [9]. Поверхностные разрастания микрофототрофов в природных условиях собирались в ненарушенном состоянии и использовались для выявления видовой принадлежности и количественных показателей. Спектр жизненных форм устанавливали по [1, 10].

### Результаты исследования

В изученных хвойных фитоценозах выявлено 97 видов и разновидностей водорослей и ЦБ, в том числе: Cyanobacteria – 23, Chlorophyta – 47, Ochrophyta – 15, Bacillariophyta – 12.

Альгофлора соснового леса охранной зоны заповедника «Нургуш». Альгофлора

представлена 54 видами микрофототрофов, среди которых преобладали представители отдела Chlorophyta – 48,1%, ЦБ составляли 22,2%, Ochrophyta – 13,0%, Bacillariophyta – 16, 7% (табл. 1).

Доминантами сообществ являлись зелёные водоросли: *Chlamydomonas gloeogama*, *Ch. elliptica*, *Chlorella vulgaris*, *Chlorococcum infusionum*, *Coccomyxa dispar*, *Stichococcus bacillaris*. Выявлены представители гетероцистных (*Nostoc punctiforme*, *N. paludosum*, *N. muscorum*, *Tolypothrix tenuis*) и безгетероцистных (*Phormidium autumnale*, *Ph. breve*, *Ph. uncinatum*, *Leptolyngbya foveolarum*, *Borzia trilocularis*) ЦБ. Численность микрофототрофов колебалась в пределах 77–100 тыс. кл./г почвы.

**Альгофлора лесных фитоценозов района объекта хранения и уничтожения химического оружия «Марадыковский».** Почвы на территории лесных фитоценозов подзолистые песчаные и супесчаные [11]. Изучалась альгофлора растительных ассоциаций: берёзово-сосновых, елово-берёзово-сосновых, берёзовых. До начала функционирования объекта в данных лесных экосистемах был выявлен 71 вид водорослей и ЦБ, в том числе: Cyanobacteria – 16 видов, Chlorophyta – 32, Ochrophyta – 15, Bacillariophyta – 8 [12]. В составе альгофлоры было отмечено представительство всех основных отделов почвенных водорослей, наибольшее видовое разнообразие составляли зелёные водоросли (представители родов *Chlamydomonas*, *Chlorella*, *Stichococcus*, *Klebsormidium*). Это согласуется с литературными данными о видовом составе водорослей лесных почв [1, 2, 14–18]. Отмечены представители жёлтозелёных и эустигматофитовых водорослей (виды родов *Botrydiopsis*, *Characiopsis*, *Eustigmatos*). Из диатомовых в еловом фитоценозе отмечена *Hantzschia amphioxys*.

Наиболее полный количественный учёт водорослей методом прямой микроскопии в лесных почвах Кировской области был проведён в 2005 г. на территории района объекта хранения химического оружия «Марадыковский» до начала его функционирования [5].

При определении численности и биомассы водорослей, а также длины мицелия и биомассы микромицетов было установлено, что эти показатели варьируют в достаточно широких пределах (табл. 2).

В почве сосновых лесов из 8 обследованных участков только на одном достигнут пик численности водорослей – 1 млн. кл./г (34-й участок). На большинстве других исследованных участков этот показатель лежит в диапазоне 300–370 тыс. кл./г. Для почв еловых лесов максимальная численность водорослей (1,2 млн. кл./г) зарегистрирована на 59-м участке. В то же время и на других участках численность водорослей несколько выше, чем в почве сосновых лесов. Соответственно показателям численности клеток водорослей, их биомасса, определённая расчётно-объёмным методом, также имеет более высокие значения в почве еловых лесов по сравнению с сосновыми. В целом значения одномоментной биомассы невелики, колеблются от 25 до 348 кг/га, однако в результате высокой скорости размножения водорослей при благоприятных условиях их первичная продукция может в сотни раз превышать показатели одномоментной биомассы [9].

Сравнение результатов количественного определения численности почвенных водорослей на одних и тех же участках в 2005 (табл. 2) и в 2016–2017 гг. (рис.) показывает некоторое снижение этих показателей в более поздний срок наблюдения, что, в первую очередь, может быть обусловлено гидротермическим режимом почвы в годы исследования. Однако каких-либо критических ситуаций, связанных

Таблица 1

Число видов водорослей и ЦБ хвойных фитоценозов

Фитоценоз	Местонахождение	Число видов									
		Cyanobacteria		Chlorophyta		Ochrophyta		Bacillariophyta		Всего	
		1	2	1	2	1	2	1	2	1	2
Сосновый	Район объекта	4	7,3	36	65,4	11	20,0	4	7,3	55	100
Еловый	«Марадыковский»	4	12,1	15	45,5	7	21,2	7	21,2	33	100
Сосновый	Пригородные леса г. Кирова	4	8,9	29	64,4	9	20	3	6,7	45	100
Сосновый	Заречный парк г. Кирова	14	25,0	24	42,9	8	14,2	10	17,9	56	100
Сосновый	ГПЗ «Нургуш»	12	22,2	26	48,1	7	13,0	9	16,7	54	100

Примечание: 1 – число видов; 2 – процент.

Таблица 2

Количественная характеристика почвенных водорослево-грибных комплексов в районе объекта хранения химического оружия «Марадыковский» (2005 г.)

№ участка	Водоросли		Микромицеты	
	численность, тыс. кл./г	биомасса, кг/га	длина мицелия, м/г	биомасса, кг/га
Сосновые леса				
4	760±40	132,9	690,6±84	1880
18	370±31	109,7	404,8±48,5	1100
19	360±18,8	64,7	108,8±9,0	247
34	1000±94,9	153,1	801,6±77,1	2184
46	311±24	92,8	890,2±176,0	2400
47	377±26	115,1	708,2±117,7	1900
65	250±40	41,0	104,0±12,7	284
112	177±9,9	25,4	273,0±39,5	553
Еловые леса				
13	532±18,8	161,4	354,2±66	970
17	551±41	168,1	794,9±44	2170
36	920±37,5	277,4	790,4±180,2	2100
55	440±55,3	94,1	680,6±44,2	1800
59	1200±210,9	348,6	435,2±90,5	1190

Таблица 3

Структура биомассы водорослево-грибных комплексов в районе объекта хранения химического оружия «Марадыковский» (2005 г.)

№ участка	Водоросли (%)	Грибы (%)	Отношение биомассы грибов к биомассе водорослей
Сосновые леса			
4	6,6	93,4	14,1:1
18	9,1	90,9	10:1
19	30,6	69,4	3,8:1
34	6,5	93,5	14,3:1
46	3,7	96,3	25,9:1
47	5,7	94,3	16,5:1
65	12,6	87,4	6,9:1
112	4,4	95,6	21,8:1
Еловые леса			
13	14,3	85,7	6:1
17	7,2	92,8	12,5:1
36	11,7	88,3	7,6:1
55	5,0	95,0	19,1:1
59	22,7	77,3	3,4:1

с элиминацией данной группы почвенных фототрофных микроорганизмов, не наблюдается ни на одном из исследованных участков.

Для характеристики лесных почв существенный интерес представляет также количественная характеристика микоценозов (табл. 2). Определённая методом прямого микроскопирования длина мицелия в исследованных лесных почвах колеблется от 108 до 890 м/г (сосняки) и от 350 до 795 м/г (ельники). Биомасса микроскопических грибов намного

выше, чем биомасса водорослей, колеблется от 284 до 2400 кг/га (сосняки) и от 970 до 2170 кг/га (ельники).

Изучение структуры биомассы водорослево-грибных комплексов показывает, что во всех случаях водоросли являются минорным компонентом при безусловном доминировании грибной составляющей – до 95-96% в почвах обоих лесных ценозов (табл. 3). Приведённые в таблице 3 соотношения между грибной и водорослевой биомассой ещё раз

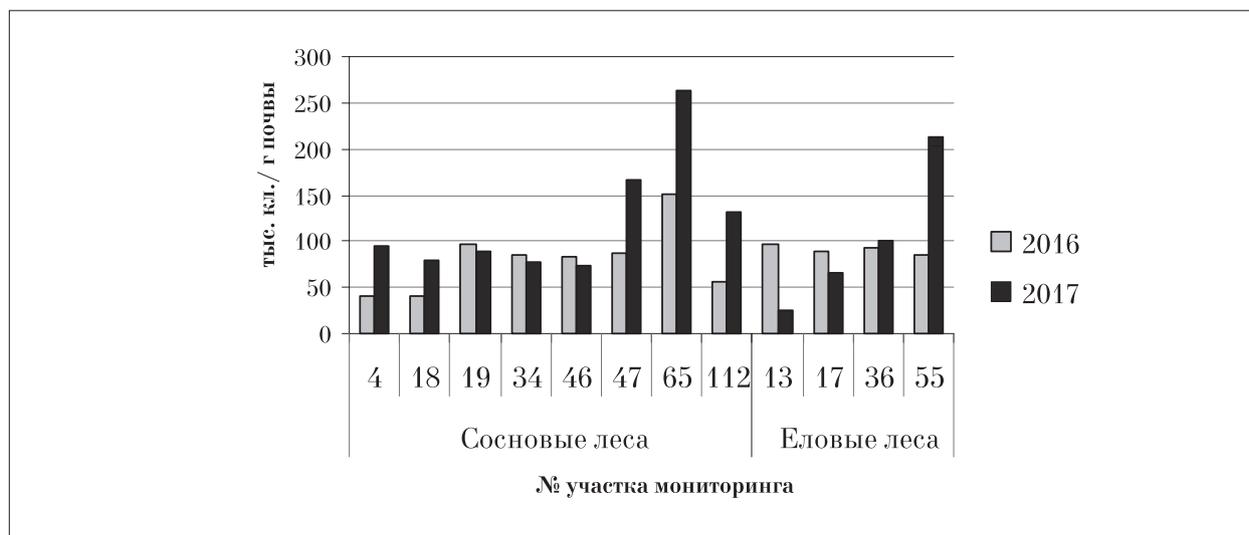


Рис. Численность водорослей и цианобактерий в районе объекта хранения и уничтожения химического оружия «Марадыковский», тыс. кл./г почвы

подчеркивают бесспорный вклад микромицетов как организмов-деструкторов в функционирование почвенных микробсообществ. Только на отдельных участках (№№ 59 и 19) биомасса микробов-продуцентов (в данном случае зелёных и диатомовых водорослей) превышает 20 и 30% соответственно.

Таким образом, наличие в лесных почвах значительный запасов динамичной биомассы фототрофных микроорганизмов и микромицетов обеспечивает определённый запас прочности при возможном поступлении в почву каких-либо поллютантов.

Альгологический мониторинг почв был продолжен и после прекращения функционирования объекта по уничтожению химического оружия. В почвах хвойных фитоценозов было выявлено 55 видов почвенных водорослей и ЦБ, таксономическая структура альгофлоры представлена 4 отделами: Cyanobacteria – 4 вида (7,3%), Chlorophyta – 36 видов (65,4%), Ochrophyta – 11 (20,0%) и Bacillariophyta – 4 (7,3%). В почвах сосновых фитоценозов было отмечено более высокое видовое разнообразие альгофлоры – 55 видов, в еловых – 33 вида. По видовому разнообразию преобладали зелёные водоросли. В состав доминантов входили: *Coccomyxa dispar*, *Pseudococcomyxa simplex*, *Chlamydomonas gloeogama*, *Chlorella vulgaris*, *Chlorococcum infusionum*, *Klebsormidium flaccidum* (Chlorophyta); *Pleurochloris commutata*, *Vischeria helvetica* (Ochrophyta). В еловых лесах, по сравнению с сосновыми, разнообразие видов диатомовых водорослей выше (7 и 4 соответственно). Из ЦБ встречены представители родов *Phormidium*, *Leptolyngbya*,

*Nostoc*. При невысоком видовом разнообразии микрорототрофов в почвах участков мониторинга наблюдается их большое сходство в отношении отдельных групп водорослей, состава доминирующих видов.

Количественные показатели альгофлоры еловых и сосновых фитоценозов района объекта «Марадыковский» приведены на рисунке 1. На участках мониторинга численность почвенных водорослей и ЦБ варьирует в широких пределах – от 59,3 до 280,5 тыс. кл./г почвы. На участках, расположенных ближе к объекту и населённому пункту и испытывающих рекреационную и техногенную нагрузки, была отмечена наименьшая численность водорослей. Более высокая численность микрорототрофов зарегистрирована на контрольном участке. Соотношение численности водорослей и ЦБ на отдельных участках мониторинга по годам сохраняется. Более высокие показатели численности отмечены в более влажном 2017 г., при этом на ряде участков, наоборот, отмечены более низкие количественные показатели клеток. Это, возможно, обусловлено более мощным развитием травяного покрова, снижающего уровень инсоляции для водорослей и ЦБ.

**Альгофлора соснового леса Заречного парка.** На территории соснового леса Заречного парка г. Кирова отмечено 56 видов водорослей и ЦБ [13]. По видовому разнообразию преобладали Chlorophyta – 42,9%, ЦБ составляли 25% видового разнообразия, что несколько выше, чем на территории соснового леса охранной зоны заповедника (табл.1). В состав доминирующего комплекса

в летний период входили зелёные водоросли: *Chlamydomonas gloeogama*, *Ch. gelatinosa*, *Chlorococcum infusionum*, *Pseudococcomyxa simplex*, *Gongrosira debaryana*. Осенью – виды рода *Chlamydomonas*, *Leptolyngbya frigida*, *Navicula pelliculosa*, *Nitzschia palea*. Из ЦБ встречаются: *Anabaena sphaerica* f. *conoidea*, *Nostoc paludosum*, *N. punctiforme*, *Tolypothrix tenuis*, *Borzia trilocularis*, *Leptolyngbya foveolarum*, *L. frigida*, *L. nostocorum*, *Microcoleus vaginatus*, *Phormidium autumnale*, *Ph. breve*, *Ph. molle*, *Ph. retzii*, *Oscillatoria limosa*, *Schizothrix friesii*. Численность клеток колебалась в пределах 60–90 тыс. кл./г почвы.

**Альгофлора пригородных хвойных лесов г. Кирова.** В пригородных хвойных лесах г. Кирова выявлено 45 видов водорослей и ЦБ. Более половины видового разнообразия составляли зелёные водоросли (виды родов *Chlamydomonas*, *Chlorococcum*, *Pseudococcomyxa*, *Chlorella*), ЦБ были отмечены на участках с нарушенным растительным покровом. Так, на зарастающей лесной просеке соснового леса были выявлены: *Anabaena* sp., *Fischerella muscicola*, *Phormidium boryanum* (ЦБ), *Pseudococcomyxa simplex*, *Cylindrocystis crassa* (Chlorophyta), *Pinnularia borealis* (Bacillariophyta). На дороге через опушку соснового леса слабое «цветение» почвы было вызвано ЦБ (*Leptolyngbya angustissima*, *Phormidium boryanum*) и зелёными водорослями (*Pseudococcomyxa simplex*, *Klebsormidium nitens*). Видовое разнообразие ЦБ на тропинке через опушку леса составляло 23 вида, доминировали азотфиксирующие ЦБ: *Fischerella muscicola*, *Scytonema ocellatum*, *Tolypothrix tenuis*, *Calothrix elenkinii*, *Anabaena sphaerica*, *Nostoc paludosum*, *N. punctiforme*, и безгетероцистные ЦБ *Phormidium boryanum*, *Microcoleus vaginatus*. Среди водорослей отмечены зелёные *Klebsormidium flaccidum*, *Cylindrocystis crassa*, *C. brebissonii* и диатомовые *Hantzschia amphioxys*, *Pinnularia borealis*.

Численность клеток фототрофов в сосновом фитоценозе пригородных лесов составляла 82,9±2,8 тыс. кл./г почвы. По численности клеток доминировали зелёные водоросли (84,1%).

Высокая численность микрофототрофов отмечена в поверхностных разрастаниях водорослей и ЦБ на тропинке через опушку леса. Доминируют ЦБ, составляя 92,7% численности клеток (табл. 4).

Таким образом, во всех изученных хвойных фитоценозах преобладали зелёные водоросли, составляя 42,9–65,4% видового разнообразия. Это представители родов *Chlamydomonas*, *Chlorococcum*, *Chlorella*, *Bracteacoccus*, *Coccomyxa*, *Pseudococcomyxa*, *Klebsormidium*. Охрофитовые водоросли (жёлтозелёные и эустигматофитовые) отмечены на всех участках, их соотношение составляло 13,0–21,2%. Выявлены виды родов *Pleurochloris*, *Botrydiopsis*, *Characiopsis*, *Eustigmatos*, *Vischeria*, *Characiopsis*.

Сравнительный анализ альгофлоры хвойных лесов фоновой территории и территорий, испытывающих техногенную (район объекта «Марадыковский») и антропогенную нагрузки (пригородные леса), показывает умеренное сходство. Коэффициенты сходства альгофлор сравниваемых лесов Съёренсена-Чекановского составляют 33,7–56,9% (табл. 5). Наибольшее сходство альгофлоры выявлено в сосновых лесах, расположенных в охранной зоне заповедника «Нургуш» и сосновом лесу в районе объекта «Марадыковский» (56,9%), наименьшее – при сравнении альгофлоры еловых лесов района объекта «Марадыковский» и Заречного парка г. Кирова. Возможно, сказывается топографическое расположение лесов и характер антропогенной нагрузки.

Виды микрофототрофов, встреченные во всех хвойных фитоценозах: *Chlamydomonas gloeogama*, *Ch. gelatinosa*, *Chlorococcum infusionum*, *Chlorella vulgaris*, *Bracteacoccus minor*, *Klebsormidium nitens*, *Pseudococcomyxa simplex*, *Pleurochloris anomala*, *Botrydiopsis eriensis*, *Eustigmatos magnus*, *Hantzschia amphioxys*, *Navicula pelliculosa*, *Pinnularia borealis*.

Экологическая структура альгофлоры хвойных лесов представлена эдафотрофными видами, составляющими 92,8–97,5% видового разнообразия (табл. 6).

Таблица 4

Особенности «цветения» почвы на опушке соснового леса

Представители микрофототрофов	Численность клеток, тыс./см <sup>2</sup>	Присутствие, %
Сyanobacteria	13160±1287	92,7
Chlorophyta	820±50	5,8
Bacillariophyta	210±40	1,5
Всего:	14190±1377	100,0

Таблица 5

Коэффициенты Сьеренсена-Чекановского хвойных фитоценозов

Фитоценоз	1	2	3	4	5
1. Сосновый лес охранной зоны заповедника «Нургуш»					
2. Сосновый лес объекта «Марадыковский»	56,9				
3. Еловый лес объекта «Марадыковский»	57,5	50,0			
4. Сосновый лес Заречного парка г. Кирова	54,5	43,2	33,7		
5. Сосновый лес в пригородной зоне г. Кирова	40,4	56,0	48,7	41,5	

Таблица 6

Экологическая структура альгофлоры хвойных лесов

Фитоценозы	Эдафофильные		Амфибиальные		Гидрофильные		Формула экобиоморф
	1	2	1	2	1	2	
Сосновый лес охранной зоны заповедника «Нургуш»	51	94,5%	1	1,8%	2	3,7%	Ch <sub>10</sub> C <sub>10</sub> B <sub>9</sub> X <sub>8</sub> H <sub>7</sub> P <sub>6</sub> CF <sub>4</sub> hydr <sub>2</sub> amph <sub>1</sub> PF <sub>1</sub>
Сосновый лес объекта «Марадыковский»	51	92,8%	2	3,6%	2	3,6%	Ch <sub>16</sub> C <sub>12</sub> X <sub>11</sub> H <sub>5</sub> B <sub>3</sub> P <sub>3</sub> amph <sub>2</sub> hydr <sub>2</sub> CF <sub>1</sub>
Еловый лес объекта «Марадыковский»	32	97,0%	0	0%	1	3,0%	Ch <sub>9</sub> X <sub>7</sub> B <sub>7</sub> C <sub>3</sub> CF <sub>2</sub> P <sub>2</sub> H <sub>2</sub> hydr <sub>1</sub>
Сосновый лес Заречного парка	53	94,6%	1	1,8%	2	3,6%	C <sub>10</sub> B <sub>10</sub> Ch <sub>9</sub> X <sub>7</sub> P <sub>7</sub> H <sub>5</sub> CF <sub>2</sub> M <sub>2</sub> amph <sub>2</sub> hydr <sub>2</sub> PF <sub>1</sub> amph <sub>1</sub>
Сосновый лес в пригородной зоне г. Кирова	39	97,5%	0	0%	1	2,5%	Ch <sub>14</sub> C <sub>10</sub> X <sub>9</sub> H <sub>4</sub> B <sub>3</sub> P <sub>2</sub> CF <sub>2</sub> hydr <sub>1</sub>

Примечание: 1 – число видов; 2 – %.

В сравниваемых фитоценозах преобладают представители Ch-, C-, X- и B-жизненных форм. Это виды, отличающиеся исключительной выносливостью к различным экстремальным условиям, обитающие в толще почвы и на её поверхности и занимающие значительное место в формировании альгофлоры в самых различных почвах (Ch-), теневыносливые виды, которые могут образовывать обильную слизь (C-), одноклеточные жёлтозелёные и многие зелёные водоросли, предпочитающие теневые условия (X-) и влаголюбивые виды (B-).

### Заключение

Альгофлора изучаемых хвойных фитоценозов соответствует зональному типу. По видовому разнообразию и численности клеток доминируют зелёные водоросли. Исследования количественного обилия фототрофов и микромицетов, проведённые в лесных фитоценозах в 2005 г. до начала действия объекта по уничтожению химического оружия «Марадыковский», выявили резервы почвенных микроорганизмов, выступающих в роли первичных продуцентов (водоросли) и редуцентов-деструкторов органического вещества (микроскопические грибы). Максимальная численность водорослей достигала 1–1,2

млн. кл./г почвы. Длина грибного мицелия колебалась в пределах 100–2400 м/г. Достаточно велики были запасы грибной биомассы (до 2,4 т/га). Была установлена доминирующая роль микромицетов (95–96%) в создании биомассы альго-микологических комплексов. В то же время водоросли, обладая сравнительно небольшой одномоментной биомассой (до 350 кг/га) активизируют протекание почвенных процессов благодаря высоким темпам размножения и обновляемости. Отмечены представители жёлтозелёных, эустигматофитовых, диатомовых водорослей и ЦБ. Наибольшее число видов ЦБ и диатомовых водорослей отмечено в почвах пойменных хвойных фитоценозов.

Экологическая структура хвойных лесов представлена эдафофильными видами, составляющими 92,8–97,5% видового разнообразия. В составе жизненных форм преобладают представители Ch-, C-, X- и B-жизненных форм.

Общая численность клеток водорослей и ЦБ на участках мониторинга после прекращения функционирования объекта колеблется в пределах от 59,3 до 280,5 тыс. кл./г почвы, доминируют зелёные водоросли.

Антропогенная нагрузка на почву в изученных хвойных фитоценозах не приводит к нарушению структуры альгосинузий, характерной для почв лесной зоны.

*Выполнено в рамках государственного задания Вятского государственного университета по теме «Механизмы адаптации и устойчивости почвенной микробиоты к техногенному загрязнению» № 5. 4962.2017/БЧ.*

### Литература

1. Алексахина Т.И., Штина Э.А. Почвенные водоросли лесных биогеоценозов. М.: Наука, 1984. 148 с.
2. Новаковская И.В., Патова Е.Н. Почвенные водоросли еловых лесов и их изменения в условиях аэротехногенного загрязнения. Сыктывкар, 2012. 128 с.
3. Штина Э. А. Водоросли дерново-подзолистых почв Кировской области // Труды Ботанического института АН СССР. Сер. 2. 1959. Вып. 12. С. 36–141.
4. Носкова Т.С. Сообщества водорослей некоторых почв Кировской области: Дис. ... канд. биол. наук. Киров, 1968. 286 с.
5. Кондакова Л.В., Домрачева Л.И. Водоросли (Видовой состав, специфика водных и почвенных биоценозов) // Флора Вятского края. Киров, 2007. Ч. 2. 192 с.
6. Чаплыгина О. Я. Почвенные водоросли сосновых и еловых лесов Московской области // Ботанический журнал. 1976. Т. 61. № 8. С. 1077–1088.
7. Домрачева Л.И., Кондакова Л.В., Попов Л.Б., Зыкова Ю.Н. Биоремедиационные возможности почвенных цианобактерий (обзор) // Теоретическая и прикладная экология. 2009. № 1. С. 8–18.
8. Леса Кировской области / Под ред. А.И. Видякина, Т.Я. Ашихминой, С.Д. Новосёлова. Киров: Кировская областная типография, 2007. 400 с.
9. Домрачева Л.И. «Цветение» почвы и закономерности его развития. Сыктывкар, 2005. 336 с.
10. Штина Э.А., Голлербах М.М. Экология почвенных водорослей. М.: Наука, 1976. 144 с.
11. Домрачева Л.И., Дабах Е.В. Количественные показатели альго-микологических комплексов как начальная ступень фонового обследования почв // Актуальные проблемы регионального экологического мониторинга: теория, методика, практика: Матер. Всерос. науч. школы. Киров, 2004. Вып. II. С. 132–135.
12. Кондакова Л.В. Альго-цианобактериальная флора и особенности её развития в антропогенно нарушенных почвах подзоны южной тайги Европейской части России: Автореф. дис. ... д-ра биол. наук. Сыктывкар. 2012. 34 с.
13. Кондакова Л. В., Пирогова О.С., Ашихмина Т. Я. Сравнительный анализ альгофлоры пойменных биогеоценозов реки Вятки на территории ГПЗ «Нургуш» и Заречного парка г. Кирова // Теоретическая и прикладная экология. 2016. № 3. С. 68–75.
14. Lukesova A. Soil algae in Brown Coal and Lignite Post-Mining areas in Central Europe (Czech Republic and Germany) // Restoration Ecology. 2001. V. 9. № 4. P. 341–350.

15. Starks T.L., Shubert L.E., Trainor F.R. Ecology of soil algae: a review // Phycological. 1981. V. 20 (1). P. 65–80.
16. Lukesova A., Hoffmann L. Soils algae from acid rain impacted forest areas of the Krusne hory Mts. 1. Algal communities // Vegetation. 1996. V. 125. P. 123–136.
17. Myers P.E. Davis J.S. Recolonization of soils by algae in a northcentral Florida pine forest after controlled fire and soil sterilization // Nova Hedwigia. 2003. V. 76. P. 207–219.
18. Maltseva I.A. Soil algae of forest ecosystems of steppe area of Ukraine // Algae in terrestrial ecosystems: Abstracts International Conference. Kaniv. 2005. P. 49.

### References

1. Aleksakhina T.I., Shtina E.A. Soil algae of forest biogeocenosis. Moskva: Nauka, 1984. 148 p. (in Russian).
2. Novakovskaya I.V., Patova E.N. Soil algae of spruce forests and their changes in conditions of aerotechnogenic pollution. Syktyvkar, 2012. 128 p. (in Russian).
3. Shtina E.A. Algae of sod-podzolic soils of the Kirov region // Trudy Botanicheskogo instituta AN SSSR. Ser. 2. 1959. V. 12. P. 36–141 (in Russian).
4. Noskova T.S. Communities of algae of some soils of the Kirov region: Dis .... kand. biol. nauk. Kirov, 1968. 286 p. (in Russian).
5. Kondakova L.V., Domracheva L.I. Algae (species composition, specificity of water and soil biocenoses) // Flora of the Vyatka Territory. Kirov, 2007. Ch. 2. 192 p. (in Russian).
6. Chaplygin O.Ya. Soil algae of pine and spruce forests of the Moscow region // Botanicheskiy zhurnal. 1976. V. 61. No. 8. P. 1077–1088 (in Russian).
7. Domracheva L.I., Kondakova L.V., Popov L.B., Zyкова Yu.N. Bioremediation potential of soil cyanobacteria (review) // Teoreticheskaya i prikladnaya ekologiya. 2009. No. 1. P. 8–18 (in Russian).
8. Forests of the Kirov region / Eds. A.I. Vidyakin, T.Ya. Ashikhmina, S.D. Novoselov. Kirov: Kirovskaya oblastnaya tipografiya, 2007. 400 p. (in Russian).
9. Domracheva L.I. “Flowering” of soil and the laws of its development. Syktyvkar, 2005. 336 p. (in Russian).
10. Shtina E.A., Hollerbach M.M. Ecology of soil algae. Moskva: Nauka, 1976. 144 p. (in Russian).
11. Domracheva L.I., Dabakh E.V. Quantitative indicators of algal-mycological complexes as an initial stage of background soil survey // Actual problems of regional ecological monitoring: theory, methodology, practice: Mater. Vseros. nauch. shkoly. Kirov, 2004. Vyp. II. P. 132–135 (in Russian).
12. Kondakova L.V. Algo-cyanobacterial flora and its development in anthropogenically disturbed soils of the subzone of the southern taiga of the European part of Russia: Avtoref. dis. ... dok. biol. nauk. Syktyvkar. 2012. 34 p. (in Russian).
13. Kondakova L.V., Pirogova O.S., Ashikhmina T.Ya. Comparative analysis of algal flora of the floodplain

ecosystems of the Vyatka river on the territory of the State Nature Reserve «Nurgush» and in Zarechnyy Park in Kirov // *Teoreticheskaya i prikladnaya ekologiya*. 2016. No. 3. P. 68–75 (in Russian).

14. Lukesova A. Soil algae in Brown Coal and Lignite Post-Mining areas in Central Europe (Czech Republic and Germany) // *Restoration Ecology*. 2001. V. 9. No. 4. P. 341–350.

15. Starks T.L., Shubert L.E., Trainor F.R. Ecology of soil algae: a review // *Phycological*. 1981. V. 20 (1). P. 65–80.

16. Lukesova A., Hoffmann L. Soils algae from acid rain impacted forest areas of the Krusne hory Mts. 1. Algal communities // *Vegetation*. 1996. V. 125. P. 123–136.

17. Myers P.E. Davis J.S. Recolonization of soils by algae in a northcentral Florida pine forest after controlled fire and soil sterilization // *Nova Hedwigia*. 2003. V. 76. P. 207–219.

18. Maltseva I.A. Soil algae of forest ecosystems of steppe area of Ukraine // *Algae in terrestrial ecosystems: Abstracts International Conference*. Kaniv. 2005. P. 49.

УДК 908.470.40+547

## **Содержание ртути в почвах и биологических объектах природных и техногенных территорий**

© 2017. А. Г. Горохова<sup>1</sup>, к. б. н., м. н. с., А. И. Иванов<sup>2</sup>, д. б. н., профессор,  
Н. А. Язынина<sup>1</sup>, м. н. с., С. Е. Ермолаев<sup>3</sup>, к. т. н., начальник,  
М. В. Ферезанова<sup>4</sup>, к. т. н., в. н. с.,

<sup>1</sup>1206 объект по хранению и уничтожению химического оружия,  
440520, Россия, Пензенская обл., Леонидовка,

<sup>2</sup>Пензенский государственный аграрный университет,  
440014, Россия, г. Пенза, ул. Ботаническая, 30,

<sup>3</sup>Федеральное управление по безопасному хранению  
и уничтожению химического оружия,  
115487, Россия, г. Москва, ул. Садовники, 4-а,

<sup>4</sup>Научно-исследовательский центр Федерального управления  
по безопасному хранению и уничтожению химического оружия,  
115487, Россия, г. Москва, ул. Садовники, 4-а,  
e-mail: fubhuho@mail.ru

В статье рассмотрена проблема содержания ртути (Hg) в почвах и биологических объектах зоны защитных мероприятий объекта УХО в пос. Леонидовка Пензенской области. Исследования показали, что среднее содержание Hg в серых лесных почвах района исследований значительно ниже ПДК и составляет 0,019 мг/кг. Среднее содержание Hg в древесных растениях было несколько выше и составило 0,0334 мг/кг. Вероятно, это объясняется контактом надземных частей растений с атмосферными выпадениями, а не миграцией Hg из почвы. Содержание Hg в исследованных образцах съедобных грибов оказалось в 3,5 раза выше, чем в почве. Вегетативный мицелий, на котором образуются их плодовые тела, находится внутри питающего субстрата и не контактирует непосредственно с атмосферными выпадениями. Поэтому грибы являются концентраторами Hg. Наиболее высокие коэффициенты накопления имели: зонтик высокий, подгруздок белый, волнушка розовая и шампиньон полевой; однако все полученные значения содержания Hg находились в пределах ПДК.

*Ключевые слова:* древесные растения, лесная растительность, мониторинг, токсичные элементы, природные среды, почвы, ртуть, грибы.

## **Content of mercury in soils and biological objects of natural and technogenic territories**

A. G. Gorokhova<sup>1</sup>, A. I. Ivanov<sup>2</sup>, N. A. Yazynina<sup>1</sup>,  
S. E. Ermolaev<sup>3</sup>, M. V. Ferezanova<sup>4</sup>,

<sup>1</sup> 1206 Facility for Storage and Destruction of Chemical Weapons, Leonidovka, Penza region, Russia, 440520,

<sup>2</sup> Penza State Agrarian University, 30, Botanicheskaya St., Penza, Russia, 440014,

<sup>3</sup> Federal Directorate for Safe Storage and Destruction of Chemical Weapons, 4 a St. Sadovniki, Moscow, Russia, 115487,

<sup>4</sup> Research and Development center of the Federal Directorate for Safe Storage and Destruction of Chemical Weapons, 4 a St. Sadovniki, Moscow, Russia, 115487

The article deals with the problem of mercury (Hg) content in soils and biological objects of the CWD plant protective measures zone in the village of Leonidovka in Penza region. Researcher proves the average Hg content in gray forest soils in the area to be much lower than the maximum permissible concentration and is 0.019 mg/kg. The average content of Hg in woody plants was slightly higher (0.0334 mg/kg). This is probably due to the contact of the plants aerial parts with atmospheric through falls rather than Hg migration from the soil. The Hg content in the samples of edible mushrooms studied was 3.5 times higher than in the soil. The vegetative mycelium on which their fruiting bodies are formed is located inside the feeding substrate and does not directly come in contact with atmospheric deposition. Therefore, mushrooms become Hg concentrators. The highest accumulation rates belonged to *Macrolepiot aprocera*, *Russula delica*, *Lactarius torminosus* and *Agaricus arvensis*, but all the Hg content values obtained were within the maximum permissible concentration.

**Keywords:** woody plants, forest vegetation, monitoring, toxic elements, natural environments, soils, mercury, mushrooms.

Ртуть является одним из важнейших токсичных элементов. Она входит в четвёрку элементов – As, Cd, Hg, Pb – на содержание которых подлежат исследованию практически все пищевые продукты. Природным источником Hg являются вулканы, которые во время извержений дают примерно половину поступления этого элемента в атмосферу. Вторая половина выбросов Hg имеет антропогенный характер. Основную долю в ней составляют выбросы от сгорания угля, добычи золота, выплавки цветных металлов, производства цемента, утилизации мусора, производства соды и т. п. [1]. В связи с этим одним из важнейших аспектов оценки экологического состояния территории является определение содержания Hg в почве и биологических объектах [2, 3]. Хотя в технологии уничтожения химических боеприпасов соединения Hg непосредственно не присутствовали, содержащие её отходы (приборы, утратившие потребительские свойства ртутные лампы, термометры и т. п.) на предприятии имелись. Этим определяется актуальность выбранного направления исследований.

Целью настоящей работы было изучение содержания Hg в почве и биологических объектах зоны защитных мероприятий (ЗЗМ) объекта УХО в окрестностях станции Леонидовка Пензенской области.

#### Объекты и методы

Отбор проб почвы и биоматериала производился в ЗЗМ объекта УХО на территории

Пензенского района, а для сравнения – в лесных массивах Шемышейского и Городищенского районов Пензенской области, удалённых от объекта не менее чем на 50 км. Всего было проанализировано 30 образцов серой лесной почвы с учётом почвенных разновидностей, 18 образцов древесных растений и 45 образцов грибов.

Измерения проводились на базе Федерального государственного учреждения государственной службы агрохимической службы «Пензенский», с использованием анализатора Hg «Юлия-2». Он предназначен для определения массовой концентрации Hg в природной и сточной воде, в вытяжках различных объектов (сырьё, пищевые продукты, почва, воздух и т. д.) Низкие пределы обнаружения Hg на уровне единиц мг/кг позволяют проводить фоновый контроль почв и пищевых продуктов на соответствие нормам ПДК [4–6].

Для определения характера накопления Hg использовался такой показатель, как коэффициент накопления (КН), представляющий собой отношение содержания химического элемента в биологическом объекте к таковому в питающем субстрате. Если КН оказывается ниже 1, то объект не является биоаккумулятором изучаемого элемента, если – выше 1, то это значит, что биоаккумуляция имеет место.

#### Результаты и их обсуждение

Территория ЗЗМ представляет собой находящуюся под лесной растительностью

площадь. Леса представлены преимущественно лиственными насаждениями различного возраста с преобладанием берёзы повислой и липы сердцевидной, с участием дуба черешчатого, осины и сосны. В зоне защитных мероприятий объекта УХО преобладают различные подтипы серых лесных почв, которые отличаются друг от друга по содержанию органического вещества и гранулометрическому составу.

Как показали наши исследования, среднее содержание Hg в серых лесных почвах района исследований составило 0,019 мг/кг, т. е. 0,039 от значения ПДК, которое составляет 2,1 мг/кг. Сравнение результатов измерений по различным разновидностям рассматриваемых почв, в зависимости от содержания органического вещества и гранулометрического состава, наблюдаемых для мышьяка, свинца и кадмия, выявлено не было [7–9]. Максимальные и минимальные показатели выражаются близкими значениями. Это указывает на то, что распределение содержания Hg в серых лесных почвах имеет достаточно равномерный характер.

Для сравнения содержания Hg в серых лесных почвах ЗЗМ с таковым в почвах других административных районов Пензенской области – Городищенского и Шемышейского, удалённых от объекта УХО – были проведены отбор и анализ проб (рис. 1). Полученные результаты выражались близкими значениями. Минимальный показатель был получен для Пензенского района, т. е. для ЗЗМ объекта УХО (рис. 1).

Как показали результаты измерений, среднее содержание Hg в древесных растениях в ЗЗМ объекта УХО составило 0,0334 мг/кг. Это в 1,75 раза выше, чем таковое в серых лесных почвах, на которых они произрастали. Однако объяснять этот факт результатом биоаккумуляции из почвы, на наш взгляд, представляется неверным, так как основным источником поступления Hg в растения являются атмосферные выпадения. Надземные же части древесных растений максимально контактируют с ними.

Как показал анализ концентрации Hg в различных частях растений, её содержание

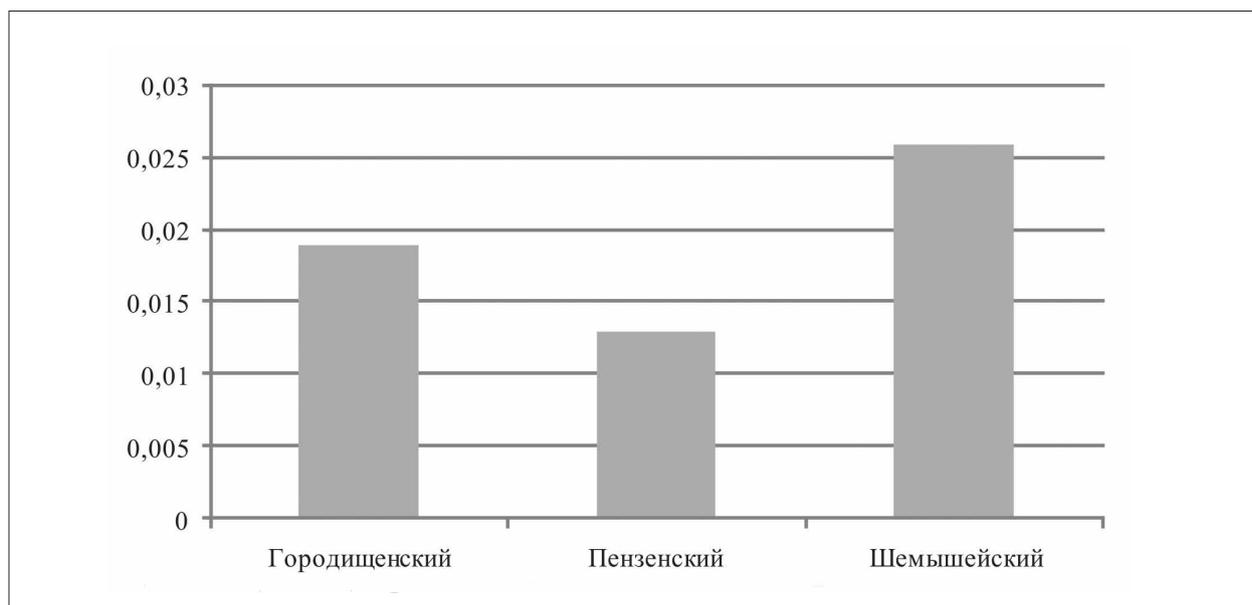


Рис. 1. Содержание Hg в серых лесных почвах в различных районах Пензенской области, мг/кг

Содержание Hg в древесных растениях, мг/кг

Таблица 1

Виды деревьев	Части растений				Средний показатель
	листья	кора	древесина		
			стволов	корней	
Берёза повислая	0,0140±0,0003	0,0225±0,0003	0,0125±0,0003	0,0012±0,0003	0,0126
Дуб черешчатый	0,0135±0,0003	0,0240±0,0003	0,0125±0,0003	0,0014±0,0003	0,0129
Сосна обыкновенная	0,0100±0,0003	0,0125±0,0003	0,0084±0,0003	0,0009±0,0003	0,0079
Средний показатель	0,0125	0,0200	0,0111	0,0012	0,0112

выражается разными показателями (табл. 1). Минимальное содержание зафиксировано в листьях. Это объясняется тем, что они живут недолго и ежегодно возобновляются, т. е. в них находится столько Hg, сколько выпало за сезон. Количество Hg в атмосферных выпадениях не является постоянным. Оно зависит от вулканической деятельности, которая является периодически действующим фактором. В период извержений содержание Hg в атмосферных выпадениях, и соответственно в листьях, сорбирующих их, станет возрастать. Однако проявляться это будет только при соответствующем направлении ветров. Антропогенное же загрязнение будет оказывать влияние локально, т.е. в непосредственной близости от его источников. Поэтому при нормальной экологической ситуации наименьшее содержание Hg в листьях оказывается вполне объяснимым. Периодическое же повышение его будет определяться указанными выше факторами.

Максимальное содержание Hg определено в коре. Она, как и листья, соприкасается с атмосферными выпадениями, однако в отличие от них не возобновляется ежегодно и аккумулирует в себе Hg и другие поллютанты в течение многолетнего периода. В древесине стволов содержание изучаемого элемента было несколько ниже, чем в коре, хотя выражалось близкими значениями. Вероятно, Hg проникает в древесину ствола путем диффузии. Это подтверждается тем фактом, что древесина корней содержит её в значительно меньших количествах.

Как показывает сравнение данных по различным древесным породам, отдельные их виды накапливают Hg в разных количествах. Максимальное суммарное содержание изучаемого элемента характерно для дуба, минимальное – для сосны. Берёза занимает среднее положение (рис. 2).

Определённые видовые отличия имеются и в характере накопления Hg в отдельных частях растений. В листьях дуба и берёзы содержание Hg выражается близкими значениями. В хвое её содержится несколько меньше. Вероятно, это связано с тем, что листья лиственных деревьев поглощают больше атмосферной влаги, т. к. имеют большую сорбционную поверхность по сравнению с хвоей.

Минимальное содержание Hg в коре зафиксировано для сосны, максимальное – для дуба. Берёза занимает среднее положение. Это может быть связано с тем, что кора дуба, содержащая большое количество отмерших

паренхиматозных клеток феллодермы, обладает большей поглощающей способностью по сравнению с корой берёзы и сосны, в составе которых больше феллемы или пробки, обладающей гидрофобными свойствами. Кроме того, особенностью покровной ткани сосны является то, что её верхняя часть в процессе роста дерева частично слущивается, и это способствует потере части накопившихся в ней веществ.

Минимальное содержание Hg в древесине стволов также было отмечено у сосны. У дуба и берёзы оно оказалось одинаковым, несмотря на различия её содержания в коре. Вероятно, это связано с тем, что в твёрдую древесину дуба Hg диффундирует из коры менее активно, чем в мягкую древесину берёзы. Распределение концентраций Hg в древесине корней различных древесных пород выражается близкими значениями. Однако минимальное содержание было также отмечено для сосны.

Содержание Hg в исследованных образцах съедобных грибов оказалось в 3,5 раза выше, чем в почве. Вегетативный мицелий, на котором образуются их плодовые тела, находится внутри питающего субстрата и не контактирует непосредственно с атмосферными выпадениями. Поэтому грибы оказываются концентраторами Hg. Однако все полученные значения находятся в пределах ПДК для съедобных грибов [5] и сопоставимы с данными других исследователей [10–12] (табл. 2).

В связи с тем, что в качестве питающего субстрата грибы используют не только почву, но и другие органические материалы, они разделяются на ряд трофических групп:

Симбиотрофы – развиваются в верхнем слое почвы и получают органические вещества от древесных растений через определённую симбиотическую структуру микоризы.

Ксилотрофы – развиваются на отмершей древесине и питаются за счет содержащихся в ней лигнина и целлюлозы.

Напочвенные сапротрофы – используют органические вещества лесной подстилки и верхнего слоя почвы.

В накоплении Hg грибами различных трофических групп проявляются определённые особенности. Наиболее высокое содержание Hg было зафиксировано в древесных субстратах, на которых развиваются ксилотрофы. Однако среднее содержание изучаемого элемента в их плодовых телах было минимальным, т.е. КН у всех изученных видов оказались менее 1. У симбиотрофов и напочвенных сапротрофов они были значительно выше.

Таблица 2

Содержание Hg в плодовых телах базидиальных макромицетов различных трофических групп, мг/кг сухого веса

Виды грибов и трофические группы	Содержание Hg, мг/кг сухого веса		
	плодовые тела	субстрат	КН
Белый гриб обыкновенный	0,0267±0,0004	0,0121±0,0003	2,21
Волнушка розовая	0,0432±0,0004	0,0111±0,0003	3,89
Берёзовик обыкновенный	0,0289±0,0004	0,0110±0,0003	2,63
Подгруздок белый	0,0503±0,0004	0,0121±0,0003	4,16
Маслёнок поздний	0,0368±0,0004	0,0110±0,0003	3,35
Симбиотрофы (средние показатели)	0,0371	0,0114	3,24
Опёнок осенний	0,0372±0,0004	0,0409±0,0004	0,91
Опёнок летний	0,0463±0,0004	0,0482±0,0004	0,96
Чага	0,0379±0,0004	0,0681±0,0004	0,56
Трутовик серно-жёлтый	0,0403±0,0004	0,0871±0,0004	0,46
Вешенка устричная	0,0473±0,0004	0,0823±0,0004	0,58
Ксилотрофы (средние показатели)	0,0418	0,0653	0,64
Шампиньон полевой	0,0477±0,0004	0,0123±0,0003	3,89
Шампиньон клубневой	0,0380±0,0004	0,0110±0,0003	3,39
Шампиньон двукольцовый	0,0433±0,0004	0,0140±0,0003	3,05
Рядовка серая	0,0383±0,0004	0,0120±0,0003	3,19
Зонтик высокий	0,0494±0,0004	0,0110±0,0003	4,45
Напочвенные сапротрофы (средние показатели)	0,0433	0,0121	3,56
Средние показатели	0,0407	0,0296	2,48
ПДК	0,05	2,1	–

Среди изученных видов грибов, используемых в пищу, наиболее высокие КН (более 3,5) имели: зонтик высокий, подгруздок белый, волнушка розовая и шампиньон полевой. Однако все значения находились в пределах ПДК. Это указывает на то, что при локальном загрязнении почв Hg плодовые тела этих видов, в первую очередь, могут представлять потенциальную опасность для здоровья.

### Выводы

1. Среднее содержание Hg в серых лесных почвах района исследований очень низкое и составляет 0,019 мг/кг, т. е. 0,039 от значения ПДК.

2. Зависимости концентраций Hg от содержания органического вещества и гранулометрического состава различных разновидностей серых лесных почв выявлено не было, т. е. распределение содержания Hg в серых лесных почвах имеет достаточно равномерный характер.

3. Среднее содержание Hg в древесных растениях составило 0,0334 мг/кг. Это значение в 1,75 раза выше, чем таковое в серых лесных почвах, на которых они произрастают. Однако

объяснять этот факт результатом биоаккумуляции из почвы, на наш взгляд, представляется неверным, так как основным источником поступления Hg в растения являются атмосферные выпадения, с которыми контактируют надземные части древесных растений.

4. Содержание Hg в исследованных образцах съедобных грибов в 3,5 раза выше, чем в почве. Вегетативный мицелий, на котором образуются их плодовые тела, находится внутри питающего субстрата и не контактирует непосредственно с атмосферными выпадениями, таким образом грибы являются концентраторами Hg.

5. Грибы различных трофических групп накапливают Hg не одинаково. Минимальные коэффициенты накопления (КН менее 1) имеют ксилотрофы. У симбиотрофов и напочвенных сапротрофов они значительно выше.

### Литература

1. Химическая энциклопедия: в 5 т. / Под ред. Н.С. Зефирова. Москва: Советская энциклопедия, 1995. Т. 4. С. 639.  
 2. Ашихмина Т.Я. Научно-методические основы комплексного мониторинга окружающей среды в районе объектов хранения и уничтожения химического оружия //

Теоретическая и прикладная экология. 2007. № 2. С. 23–35.

3. Юргенсон Г.А., Солодухина М.А., Смирнов А.А. К проблеме биологического поглощения токсичных химических элементов растениями в природных и геотехногенных системах // Вестник МАНЭБ. 2009. Т. 14. № 3. С. 110–113.

4. МИ 2740-2002. Рекомендация. ГСИ. Массовая доля общей ртути в пищевых продуктах и продовольственном сырье. Методика выполнения измерений атомно-абсорбционным методом.

5. СанПиН 42-123-4089-86 Предельно допустимые концентрации тяжёлых металлов и мышьяка в продовольственном сырье и пищевых продуктах (утв. Главным санитарным врачом СССР 31.03.1986 № 4089-86). 1986. 17 с.

6. Трахтенберг И.М., Коршун М.Н. Ртуть и её соединения в окружающей среде (гигиенические и экологические аспекты) / Под ред. И. М. Трахтенберга. Киев: Выща шк., 1990. 232 с.

7. Горохова А.Г., Иванов А.И., Скобанева О.В. Биоиндикация почв, загрязнённых мышьяком и тяжёлыми металлами // XXI век: итоги прошлого и проблемы настоящего плюс. 2013. Т. 1. № 9 (13). С. 39–47.

8. Горохова А.Г. Распределение тяжёлых металлов (Cu, Zn, Ni, Pb) и мышьяка (As) в природных средах и биологических объектах правобережной части водосборной площади Пензенского водохранилища: Автореф. ... канд. биол. наук. Пенза, 2013. 21 с.

9. Иванов А.И., Костычев А.А. Фоновое содержание некоторых тяжёлых металлов в серых лесных почвах // Мониторинг природных экосистем: Сборник статей четвертой Всероссийской научно-практической конференции. Пенза, 2010. С. 166–169.

10. Svoboda L., Zimmermannova K., Kalac P. Concentrations of mercury, cadmium, lead and copper in fruiting bodies of edible mushrooms in an emission area of a copper smelter and a mercury smelter // The Science of the Total Environment. 2000. P. 61–67.

11. Demirbas A. Concentration of 21 metals in 18 species of mushroom growing in the East Black Sea region // Food Chemistry. 2001. V. 75. P. 453–457.

12. Ita B.N., Essien J.P., Ebong G.A. Heavy metal levels in fruiting bodies of edible and non-edible mushrooms from the Delta Region of Nigeria // Journal of Agriculture & Social Sciences. 2006. No. 2. P. 84–87.

## References

1. Chemical Encyclopedia: in 5 vol. / Red. N.S. Zefirov. Moskva: Sovetskaya Entsiklopediya, 1995. T. 4. 639 p. (in Russian).

2. Ashikhmina T.Ya. Scientific and methodological bases of complex environmental monitoring in the area of storage and destruction of chemical weapons // Teoreticheskaya i prikladnaya ekologiya. 2007. No. 2. P. 23–35 (in Russian).

3. Juergenson G.A., Solodukhina M.A., Smirnov A.A. The problem of biological absorption of toxic chemical elements by plants in natural and geotechnical systems // Vestnik MANEB. 2009. T. 14. No. 3. P. 110–113 (in Russian).

4. MI 2740-2002. Recommendation. GSI. Mass fraction of total mercury in food products and food raw materials. Method of performing measurements by atomic absorption method (in Russian).

5. SanPiN 42-123-4089-86 The maximum permissible concentrations of heavy metals and arsenic in food raw materials and foodstuffs (approved by the Chief Sanitary Doctor of the USSR on March 31, 1986, No. 4089-86). 1986. 17 p. (in Russian).

6. Trakhtenberg I.M., Korshun M.N. Mercury and its compounds in the environment (hygienic and environmental aspects) / Red. I.M. Trakhtenberg. Kiev: Vysshaya shkola, 1990. 232 p. (in Russian).

7. Gorokhova A.G., Ivanov A.I., Skobaneva O.V. Bioindication of soils polluted with arsenic and heavy metals // XXI century: results of the past and problems of the present plus. 2013. T. 1. No. 9 (13). P. 39–47 (in Russian).

8. Gorokhova A.G. Distribution of heavy metals (Cu, Zn, Ni, Pb) and arsenic (As) in natural media and biological objects on the right-bank part of the catchment area of the Penza reservoir: Avtotref. ... dis. kand. biol. nauk. Penza, 2013. 21 p. (in Russian).

9. Ivanov A.I., Kostychev A.A. Background content of some heavy metals in gray forest soils // Monitoring of natural ecosystems: Sbornik trudov Chetvertoy vserossiyskoy nauchnoy i prakticheskoy konferentsii. Penza, 2010. P. 166–169 (in Russian).

10. Svoboda L., Zimmermannova K., Kalac P. Concentrations of mercury, cadmium, lead and copper in fruiting bodies of edible mushrooms in an emission area of a copper smelter and a mercury smelter // The Science of the Total Environment. 2000. P. 61–67.

11. Demirbas A. Concentration of 21 metals in 18 species of mushroom growing in the East Black Sea region // Food Chemistry. 2001. V. 75. P. 453–457.

12. Ita B.N., Essien J.P., Ebong G.A. Heavy metal levels in fruiting bodies of edible and non-edible mushrooms from the Delta Region of Nigeria // Journal of Agriculture & Social Sciences. 2006. No. 2. P. 84–87.

## Реализация ФЦП «Уничтожение запасов химического оружия в Российской Федерации» на территории Кировской области

В Кировской области хранилось 17,4% запасов химического оружия от общероссийских запасов или более 40 тыс. боеприпасов, содержащих около 7 тыс. тонн отравляющих веществ.

Учёными, разработчиками технологий предлагались новые технологии уничтожения химического оружия (ХО), которые порой были апробированы только в лабораторных условиях, и предстоящая реализация их в промышленных объёмах вызывала некоторые опасения. Для того чтобы новые технологии заработали, необходимо было решить серьёзные инженерные проблемы. Ведь аналогов таких производств не было. Весь технологический процесс необходимо было просчитать с нуля и без права на ошибку.

С целью обеспечения экологической безопасности здоровья населения, проживающего вблизи создаваемого объекта уничтожения ХО, предстояло решить задачи обеспечения его средствами защиты, оповещения, создания запасов антидотов, разработки планов эвакуации и т. д. Требовалось создание системы экологического контроля и мониторинга за деятельностью объекта, решения вопросов медицинского обследования населения, проживающего в зоне защитных мероприятий.

Практически все проблемы по своей новизне и масштабности характеризовались словом «впервые» и решать их надо было на фоне крайне отрицательного отношения населения к уничтожению ХО в регионе. Именно в таких условиях началась совместная деятельность Федерального управления по безопасному хранению и уничтожению ХО и Правительства Кировской области. В связи с этим общая цель, общее понимание путей решения проблемы уничтожения ХО явились основой конструктивного, плодотворного сотрудничества.

Необходимо также отметить, что решения по всем принципиальным вопросам принимались Федеральным управлением с учётом мнения правительства, природоохранных служб, научной общественности Кировской области. Это и выбор места расположения объекта уничтожения ХО, выбор технологии уничтожения, создание системы контроля и мониторинга, оценка воздействия объекта на окружающую среду, строительство объектов социальной инфраструктуры, которые создавались в интересах развития Кировской области.

От закладки первого камня на площадке объекта «Марадыковский» до пуска первой очереди объекта потребовалось всего полтора года. Строительство объекта велось в строгом соответствии с графиком, утверждённым начальником Федерального управления по безопасному хранению и уничтожению ХО генерал-полковником В.П. Капашиним. За это время на пустыре, в лесном комплексе Оричевского района вблизи п. Мирный, выросло высокотехнологичное предприятие, оснащённое самым современным оборудованием.

Уничтожение боеприпасов на объекте осуществлялось в штатном режиме при постоянном контроле со стороны природоохранных органов. Замечаний по хранению и уничтожению ХО на объекте «Марадыковский» со стороны Международной организации по запрещению ХО не поступало. Безусловным, основополагающим требованием к деятельности по уничтожению ХО являлось обеспечение безопасности для работающего персонала, населения, проживающего на территории зоны защитных мероприятий, и сохранения окружающей среды.

Взвешенный, продуманный подход, прежде всего Федерального управления, в выборе технологий и реализации технических решений позволил достичь требуемого результата. Для контроля возможного воздействия объекта «Марадыковский» была разработана уникальная 3-уровневая система государственного экологического контроля и мониторинга, которой ранее не было в России. По программе мониторинга в зоне защитных мероприятий создана специальная сеть пробоотбора, включающая 155 постоянных пунктов отбора проб воздуха, почв, воды, донных отложений. Для контроля подземных вод пробурено 11 наблюдательных скважин. Под контролем находилось 7 колодцев, 14 эксплуатационных скважин.

За время деятельности объекта «Марадыковский» не было зафиксировано выбросов и сбросов отравляющих веществ и продуктов их деструкции в окружающую природную среду. Результаты проведённых работ по программе государственного экологического контроля и мониторинга подтверждают, что за всё время работы объект «Марадыковский» не оказывал и не оказывает негативного техногенного воз-

действия на окружающую среду. Состояние экологической обстановки в зоне его влияния удовлетворительное.

С 2005 г. проводится непрерывный мониторинг здоровья обслуживающего персонала и населения, проживающего в зоне защитных мероприятий (ЗЗМ) объекта «Марадыковский». За период 2005–2016 гг., по данным выездных бригад врачей, в рамках программы проведено комплексное клиничко-лабораторное обследование 4727 детей в возрасте до 16 лет, а стационарное обследование прошли 436 детей и подростков.

Сравнительное комплексное обследование детей при диспансерном наблюдении и в условиях стационара до и после пуска объекта и проведённые другие исследования не выявили ухудшения показателей заболеваемости детей, что свидетельствует об отсутствии влияния объекта «Марадыковский» на здоровье детского населения и отрицает причинно-следственную связь заболеваемости с деятельностью по уничтожению ХО.

Аналогичные данные получены и по состоянию здоровья взрослого населения. Поэтому врачами-специалистами сделан вывод о том, что объект хранения и уничтожения ХО не оказывает воздействия на здоровье населения, и это подтверждается данными экологического мониторинга.

В условиях отсутствия негативного воздействия на окружающую среду и на здоровье людей тем не менее выполнен весь комплекс превентивных мероприятий по защите населения, проживающего в ЗЗМ: созданы запасы средств защиты и антидотов, разработана система оповещения, схемы эвакуации и т. д.

Одновременно со строительством объекта по уничтожению ХО в интересах развития области велось строительство объектов соц-инфраструктуры. На решение социальных вопросов в местах расположения объектов по уничтожению ХО Федеральной целевой программой «Уничтожение запасов химического оружия в РФ» было предусмотрено выделение до 10% средств от стоимости капитальных вложений на строительство каждого объекта по уничтожению химического оружия. Для реализации этой задачи, с учётом потребностей района расположения строящегося объекта был разработан и утверждён «Перечень объектов социальной инфраструктуры», строительство которых обеспечивалось за счёт инвестиций федерального бюджета в рамках ФЦП «Уничтожение запасов химического оружия в РФ».

Данный перечень разрабатывался с учётом предложений глав администраций Оричевского и Котельничского районов, утверждён губернатором Кировской области и директором Департамента реализации конвенционных обязательств Министерства промышленности и торговли В.И. Холстовым.

Согласно данному перечню на территории Кировской области введено в эксплуатацию 23 объекта на сумму 1 909 371 263,5 руб.

Таким образом, в ходе реализации Федеральной целевой программы «Уничтожение запасов химического оружия в Российской Федерации» на территории Кировской области:

- уничтожено около 7 тыс. т отравляющих веществ;
- создан промышленный комплекс с развитой инженерной инфраструктурой, который может быть вовлечён в хозяйственный оборот на службу региона;
- за время деятельности объект «Марадыковский» не оказывал и не оказывает негативного техногенного воздействия на окружающую среду, на здоровье населения, не были зафиксированы выбросы и сбросы отравляющих веществ и продуктов их деградации в окружающую среду;
- на территории Кировской области введено в эксплуатацию 23 объекта на сумму 1 909 371 263,5 руб.

Деятельность объекта «Марадыковский» объединила усилия научных и проектных институтов, строительных и промышленных предприятий, принимавших участие в его создании. За короткое время были реализованы уникальные технологии, воплощены превосходные инженерные и технологические решения. Главная роль в этом принадлежит прежде всего руководству, военным специалистам, учёным Федерального управления по безопасному хранению и уничтожению химического оружия. ХО на объекте «Марадыковский» было уничтожено в период с 6 сентября 2006 г. по 11 сентября 2015 г. Это не просто период деятельности объекта уничтожения, это 3293 дня напряжённого, связанного с риском для жизни, но такого необходимого и обязательного труда без права на ошибку. Эти повседневные серые будни для людей, работавших на объекте, по сути своей есть каждодневный подвиг. В знак признательности тем людям, кто уничтожал запасы ХО, оберегая при этом здоровье людей и состояние окружающей среды, в городе Кирове открыта памятная стена.

Над уничтожением ХО в России работали десятки тысяч людей, десятки научных, про-

изводственных и строительных организаций. Объединить их усилия, сплотить на выполнение столь грандиозной и масштабной задачи, добиться в их работе слаженности действий часового механизма, обеспечив при этом безаварийную работу и соблюдение всех экологических и санитарных норм и правил, смог руководитель Федерального управления по безопасному хранению и уничтожению ХО генерал-полковник Валерий Петрович Капашин. Особые слова благодарности этому талантливому руководителю. За пятнадцать лет строительства объектов

и промышленной ликвидации ХО он и подчинённый ему коллектив сделали практически невозможное – создали безопасные объекты ликвидации ХО, практически не загрязняющие окружающую среду и уничтожили все заявленные запасы ХО в Российской Федерации.

*А. П. Денисенко,  
начальник отдела специальных  
мероприятий Министерства  
энергетики и жилищно-коммунального  
хозяйства Кировской области*

### **25 лет Федеральному управлению по безопасному хранению и уничтожению химического оружия**

22 августа 2017 г. исполнилось 25 лет со дня образования Федерального управления по безопасному хранению и уничтожению химического оружия.

Коллектив Управления встретил эту дату новыми трудовыми успехами. На последнем объекте по уничтожению химического оружия (ХО) в пос. Кизнер Удмуртской Республики к этой дате все работы по уничтожению боевых отравляющих веществ (ОВ) приближались к завершению.

Начальником Федерального управления по безопасному хранению и уничтожению ХО, доктором технических наук, профессором, дважды лауреатом премии Правительства Российской Федерации в области науки и техники, генерал-полковником В.П. Капашиным перед коллективом всего Управления была поставлена чёткая задача, нацеленная на досрочное, в целом, выполнение заданий Гособоронзаказов и уничтожение запасов химического оружия.

Чтобы достичь этого исторического момента, Федеральному управлению пришлось приложить воистину титанические усилия. Поочередно решались возникавшие вопросы: формирование воинских частей по охране и обороне семи российских арсеналов химических боеприпасов, переоснащение технических систем их охраны и видеонаблюдения, подготовка и принятие нормативно-правовой базы по организации процесса уничтожения ХО, выработка взаимоприемлемых позиций с региональными властями и местным населением, строительство промышленных предприятий и вспомогательных объектов

для непосредственного уничтожения боевых ОВ, создание безопасных технологий по уничтожению ХО, строительство зданий и сооружений социальной инфраструктуры в интересах развития территорий, наконец, самый ответственный этап – практическое уничтожение химического оружия и многие другие.

Коллектив Федерального управления 27 сентября 2017 г. завершил выполнение поставленной боевой задачи. Она выполнена образцово, на год раньше установленного срока, при экономии более 2 миллиардов рублей федерального бюджета. Полностью соблюдены требования безопасности, не допущено ни одного случая прорыва ОВ в окружающую среду, не нанесено ущерба экологии, ни один человек не пострадал от ОВ во время их уничтожения. Впереди у коллектива Федерального управления новые задачи и предстоящие новые победы!

Редколлегия журнала «Теоретическая и прикладная экология» поздравляет коллектив Федерального управления по безопасному хранению и уничтожению химического оружия и лично профессора, генерал-полковника В.П. Капашина с этим историческим событием, с блестяще и достойно выполненным государственным заданием и желает в дальнейшем новых государственно значимых программ и научно-технических проектов, благополучия и здоровья.

*Главный редактор Т.Я. Ашихмина  
и редколлегия журнала  
«Теоретическая и прикладная экология»*

**Завершено уничтожение химического оружия на семи российских объектах. Этому событию посвящено открытие памятных стел, символизирующих полное избавление нашей страны от запасов химического оружия**



Открытие стелы в г. Кирове



Открытие стелы в г. Щучье



Открытие стелы в Ленидовке  
Пензенской области



Открытие памятного знака в г. Почеп  
Брянской области

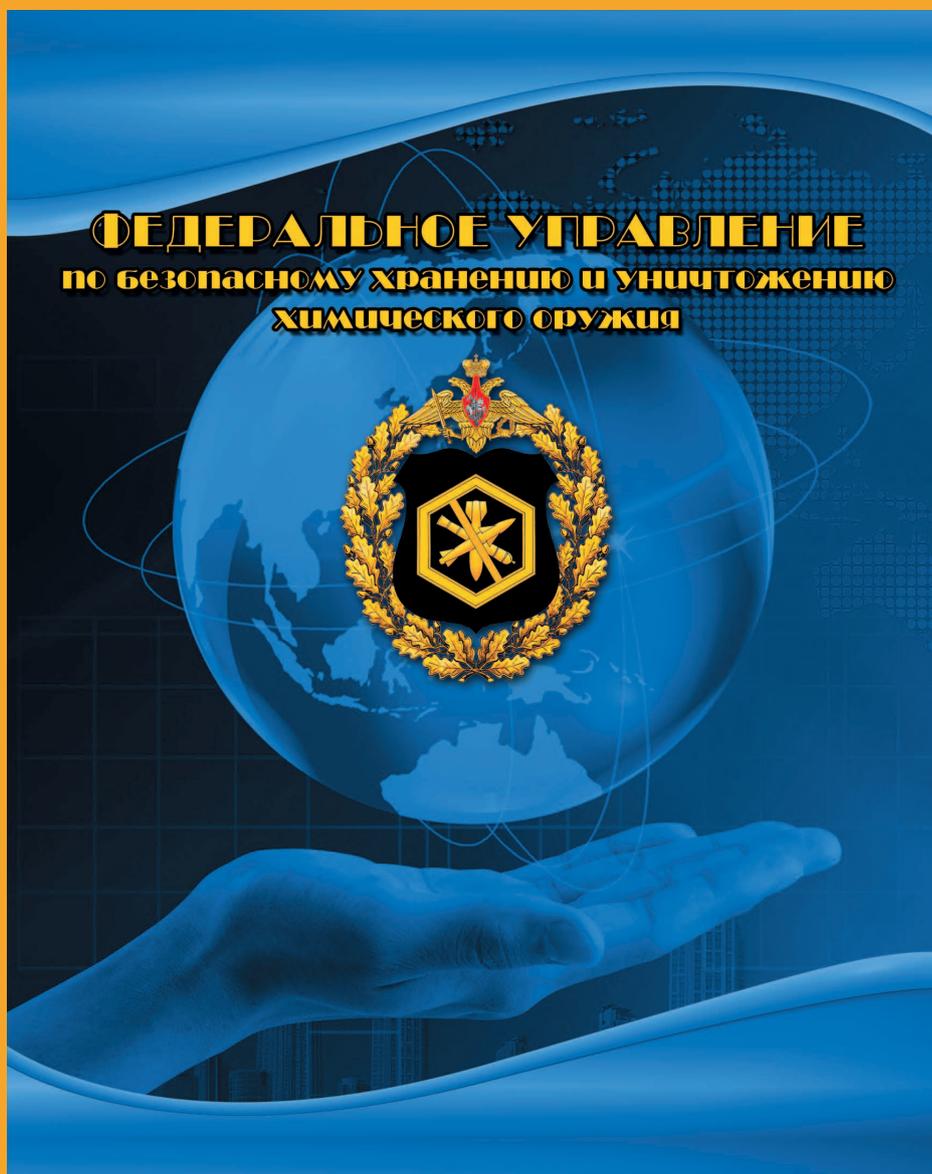


Торжественный митинг, посвящённый  
окончанию работ по уничтожению химического  
оружия на объекте № 1208 «Кизнер»

Индекс 82027, 48482



**МИНПРОМТОРГ  
РОССИИ**



**ФЕДЕРАЛЬНОЕ УПРАВЛЕНИЕ  
по безопасному хранению и уничтожению  
химического оружия**

ISSN 1995-4301



9 771995 430004